

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**



***PROYECTO FINAL DE CARRERA***

INGENIERÍA INDUSTRIAL SUPERIOR  
ESPECIALIDAD: MECÁNICA DE MÁQUINAS Y ESTRUCTURAS

**DISEÑO DE UN CONTROLADOR BASADO  
EN LÓGICA DIFUSA PARA MEJORAR EL  
COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN  
VEHÍCULO AUTOMÓVIL**

**AUTORA:** Dña. Raquel Mondelo García  
**TUTORAS:** Dra. María Jesús López Boada y Dra. Beatriz López Boada

Abril 2015

# ÍNDICE

---



## ÍNDICE

---

1 Introducción .....	9
1.1. Estructura de la memoria .....	10
2 Objetivos .....	11
3 Sistemas de un vehículo automóvil .....	12
3.1 Definición y partes del automóvil .....	12
3.1.1 Estructura metálica .....	12
3.1.2 Motor .....	15
3.1.3 Equipo eléctrico .....	17
3.1.4 Transmisión .....	17
3.1.5 Rueda .....	25
3.1.6 Freno .....	26
3.1.7 Dirección .....	28
3.1.8 Suspensión .....	33
3.1.8.1 Introducción a la suspensión. Misión y funcionamiento .....	33
3.1.8.2 Requisitos a cumplir .....	34
3.1.8.3 Elementos de la suspensión .....	34
3.1.8.3.1 Elementos elásticos .....	34
3.1.8.3.2 Amortiguadores .....	38
3.1.8.3.3 Elementos de sujeción y guiado .....	41
3.1.8.4 Tipos de suspensión .....	43
3.1.8.4.1 Según la geometría .....	43
3.1.8.4.2 Según el sistema de control .....	46
3.2 Dinámica vehicular .....	52
3.2.1 Fuerzas que actúan sobre el vehículo .....	52
3.2.2 Tipos de movimiento .....	54
3.2.3 Dinámica vertical. Modelización del vehículo .....	55
3.2.3.1 Sensibilidad humana a las vibraciones verticales .....	55



## ÍNDICE

---

3.2.3.2 Modelos dinámicos de suspensión .....	55
3.2.3.3 Modelo de dos grados de libertad: un cuarto de vehículo .....	56
4 Lógica fuzzy .....	57
4.1 Control y lógica difusa .....	57
4.1.1 Fundamentos.....	57
4.1.2 Antecedentes del control difuso .....	59
4.1.3 Conjuntos difusos y funciones características.....	60
4.1.3.1 Operaciones con conjuntos difusos.....	62
4.1.3.2 Relaciones difusas.....	63
4.1.4 Inferencia difusa .....	64
4.1.4.1 Fundamentos de la lógica proposicional .....	65
4.1.4.2 Implicación difusa .....	66
4.1.4.3 Reglas difusas.....	67
4.1.5 Diagrama de bloques basado en técnicas de lógica difusa.....	68
4.1.5.1 Mecanismo de inferencia .....	68
4.1.5.1.1 Conectivos lógicos entre antecedentes.....	69
4.1.5.1.2 Implicación difusa. Superficies de implicación .....	71
4.1.5.1.3 Agregación lógica .....	71
4.1.5.2 Métodos de desfusión.....	72
4.2 Procedimiento para definir un control difuso .....	73
4.2.1 Definición de variables .....	73
4.2.2 Definición de los espacios entrada-salida .....	73
4.2.3 Fuzzificación de las variables de entrada .....	73
4.2.4 Base del conocimiento .....	73
4.2.5 Proceso de inferencia .....	73
4.2.6 Defuzzificación. ....	75
5 Software utilizado .....	76





## ÍNDICE

---

5.1 CarSim .....	76
5.2 Simulink de Matlab .....	79
6 Desarrollo del controlador basado en lógica fuzzy .....	90
7 Resultados de simulación .....	94
8 Conclusiones y futuros desarrollos .....	103
9 Referencias bibliográficas .....	104



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Bastidor en H .....	12
Figura 3.2. Bastidor en X .....	13
Figura 3.3. Bastidor perimétrico .....	13
Figura 3.4. Bastidor tubular .....	13
Figura 3.5. Plataforma con carrocería separada .....	14
Figura 3.6. Plataforma con carrocería separada .....	14
Figura 3.7. Carrocería monocasco .....	15
Figura 3.8. Carrocería autoportante .....	15
Figura 3.9. Parte exterior de un motor .....	16
Figura 3.10. Partes móviles del motor .....	16
Figura 3.11. Motor de 4 tiempos .....	17
Figura 3.12. Motor de 2 tiempos .....	17
Figura 3.13. Motor delantero y propulsión .....	18
Figura 3.14. Motor delantero y tracción .....	18
Figura 3.15. Transmisión total .....	19
Figura 3.16. Árbol de transmisión .....	19
Figura 3.17. Caja de velocidades .....	20
Figura 3.18. Mecanismo cónico diferencial .....	21
Figura 3.19. Embrague de fricción .....	22
Figura 3.20. Embrague automático .....	22
Figura 3.21. Embrague hidráulico .....	23
Figura 3.22. Embrague de muelle helicoidal .....	23
Figura 3.23. Embrague de diafragma .....	24
Figura 3.24. Embrague de discos múltiples .....	24
Figura 3.25. Embrague electromagnético .....	25
Figura 3.26. Distintos montajes de las ruedas .....	25
Figura 3.27. Elementos de la rueda .....	26



## ÍNDICE

---

Figura 3.28. Esquema básico de un circuito de frenos .....	27
Figura 3.29. Sistema de dirección .....	28
Figura 3.30. Componentes del sistema de dirección .....	29
Figura 3.31. Geometría de giro .....	30
Figura 3.32. Ángulo de salida .....	31
Figura 3.33. Ángulo de caída .....	31
Figura 3.34. Ángulo de avance .....	32
Figura 3.35. Ángulo de convergencia .....	33
Figura 3.36. Interposición de elementos elásticos entre las ruedas y la carrocería .....	34
Figura 3.37. Gráfica recorrido-fuerza en resortes de distinto tarado .....	35
Figura 3.38. Influencia del tarado en el recorrido y la frecuencia de las oscilaciones .....	35
Figura 3.39. Funcionamiento del amortiguador bitubo a compresión .....	40
Figura 3.40. Funcionamiento del amortiguador bitubo a extensión .....	40
Figura 3.41. Funcionamiento de un amortiguador de gas en ambos sentidos .....	41
Figura 3.42. Esquema de una suspensión semiactiva .....	47
Figura 3.43 Esquema de suspensión activa .....	48
Figura 3.44. Cabeceo, balanceo y guiñada de un vehículo .....	55
Figura 3.45. Modelo un cuarto de vehículo .....	56
Figura 3.46. Modelo un grado de libertad .....	56
Figura 4.1. Función de pertenencia .....	57
Figura 4.2. Fuzzificación .....	58
Figura 4.3. Defuzzificación .....	59
Figura 4.4. Ejemplos de funciones características .....	62
Figura 4.5. Diagrama de bloques de un sistema basado en lógica difusa .....	68
Figura 4.6. Tablas de verdad expresadas gráficamente .....	70
Figura 4.7. Ejemplo de variables de entrada proceso de inferencia .....	74
Figura 4.8. Ejemplo de aplicación de reglas .....	74



## ÍNDICE

---

Figura 4.9. Ejemplo de membresías de salida .....	74
Figura 5.1. Pantalla principal de CARSIM .....	76
Figura 5.2. Menús de la pantalla principal de CARSIM .....	77
Figura 5.3. Creación de una carpeta en Carsim .....	78
Figura 5.4. Modelo dado por Carsim .....	79
Figura 5.5. Modelo suspensión activa .....	80
Figura 5.6. Modelo suspensión pasiva .....	80
Figura 5.7. Menú bloques simulink .....	81
Figura 5.8. Mux, scope y gain .....	82
Figura 5.9. Bloque derivativo .....	83
Figura 5.10. Bloque Memoria .....	84
Figura 5.11. Bloque “to file” .....	85
Figura 5.12. Bloque fuzzy .....	86
Figura 5.13. Creación de fuzzy .....	87
Figura 5.14. Creación del archivo .fis .....	87
Figura 5.15. Creación de gráficas fuzzy .....	88
Figura 5.16. Reglas fuzzy .....	89
Figura 6.1. Menú variables Carsim .....	91
Figura 6.2. Variables de salida .....	92
Figura 6.3. Adición variable de salida .....	92
Figura 7.1. Variable de entrada desplazamiento .....	94
Figura 7.2. Variable de entrada velocidad .....	95
Figura 7.3. Variable de salida fuerza .....	96
Figura 7.4. PSD para suspensión activa .....	97
Figura 7.5. PSD para suspensión pasiva .....	97



## ÍNDICE

---

Figura 7.6. Resultados fuzzy para la variable de entrada desplazamiento .....	98
Figura 7.7. Resultados fuzzy para la variable de entrada velocidad .....	99
Figura 7.8. Resultados fuzzy para la variable de salida fuerza .....	100
Figura 7.9. Resultados PSD con control .....	101
Figura 7.9. Resultados PSD sin control .....	101
Figura 7.11. Resultados .....	102



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Valores usuales del coeficiente de rozamiento .....	52
Tabla 3.2. Valores del coeficiente de proporcionalidad .....	53
Tabla 4.1. Operaciones entre las proposiciones .....	65
Tabla 4.2. Equivalencias de los operadores .....	65
Tabla 4.3. Operadores algebraicos utilizados en la lógica proposicional y la teoría de conjunto .....	66
Tabla 4.4. Tablas de verdad de los conectivos lógicos .....	69
Tabla 4.5. Tablas de verdad para los operadores and, or y not difusos .....	69

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

---

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

---

Desde el inicio del desarrollo del vehículo automóvil ha existido un sistema de suspensión para dar confort y seguridad a los pasajeros. En sus orígenes han existido sistemas más rígidos y han ido evolucionando en el tiempo hasta dar con las soluciones que se conocen hoy en día.

La función de la suspensión de un automóvil es absorber las desigualdades del terreno y a la vez mantener las ruedas en contacto con el pavimento en todo momento para que las irregularidades no se transmitan a los pasajeros.

En los últimos años la suspensión de un turismo está cobrando cada vez más importancia y a medida que pasa el tiempo se encuentran soluciones más seguras y baratas.

Un hecho importante en la historia de las suspensiones fue la introducción de una suspensión en la cual se puede variar la respuesta según el instante y la posición de la suspensión. Es la llamada suspensión activa.

En este proyecto se va a comparar el comportamiento del vehículo con una suspensión activa y otra pasiva para saber cuál es el que da mejores resultados de cara al confort del pasajero.

Para estudiar esto se va a utilizar herramientas informáticas ya que permiten hacer los cálculos con más exactitud y rapidez, además de que se permite una simulación más real del vehículo.



## 1.1 Estructura de la memoria

Este proyecto consta de 9 capítulos. El primero de ellos es la presente introducción. A continuación se realiza un breve resumen de los demás:

- Capítulo 2. Objetivos: finalidad y motivación del proyecto.
- Capítulo 3. Sistemas de un vehículo automóvil: se muestra el funcionamiento y la dinámica de un vehículo así como las partes o elementos que lo constituyen, profundizando en la dinámica vertical que es la que más influye en los sistemas de suspensión a estudiar.
- Capítulo 4. Lógica fuzzy: fundamentos, antecedentes, definición, características, clasificación de los tipos de conectores y procedimiento.
- Capítulo 5. Software utilizado: se define qué tipo de herramientas informáticas se utilizan.
- Capítulo 6. Desarrollo del controlador basado en lógica fuzzy: estudio de los parámetros a analizar y desarrollo del procedimiento para la obtención de los mismos.
- Capítulo 7. Resultados de simulación: deducciones y resultados del análisis realizado.
- Capítulo 8. Conclusiones y futuros desarrollos.
- Capítulo 9. Referencias bibliográficas.

# CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

---

## CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

---

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de un controlador basado en lógica borrosa que mejore el comportamiento vertical de un vehículo automóvil. Para ello, es necesario cumplir con otros objetivos:

- Optimizar el controlador a través de la lógica borrosa que gobierna la suspensión activa para aumentar los valores de confort, atendiendo a la aceleración vertical, con respecto a los que tendría el mismo vehículo con una suspensión pasiva.
- Lograr un mayor control sobre la suspensión para aumentar la seguridad de los pasajeros, evitando que las suspensiones hagan llegar al vehículo a las situaciones límite de balanceo y cabeceo.
- Controlar las frecuencias a las que oscila la suspensión para que sean soportables por el ser humano y comparar dichas frecuencias en suspensión pasiva y activa.
- Obtener los valores de la función RMS para estudiar cual de los dos tipos de suspensión a analizar tiene mejor comportamiento dinámico.
- Aprender el manejo y uso de los programas informáticos CARSIM y SIMULINK.

# CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

## 3.1 Definición y partes del automóvil

### 3.1.1 Estructura metálica

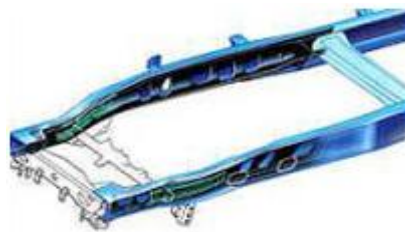
La función principal de la estructura metálica es servir de almacén para poder colocar sobre ella el resto de elementos y soportar tanto la carga como el peso de los pasajeros.

Está formada por dos partes:

➤ Bastidor

El bastidor es un conjunto de vigas de distintos tamaños y formas que, combinadas adecuadamente, constituyen la base del chasis del vehículo [1]. Sobre él se colocan los ejes, la transmisión, la cabina y las piezas de la carrocería.

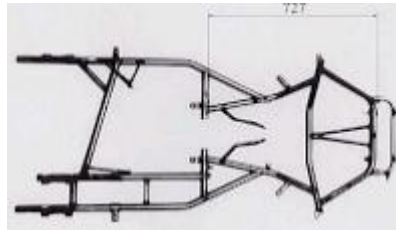
Existen varios tipos de bastidores. En primer lugar, el bastidor en escalera o en H (véase figura 3.1) formado por dos largueros laterales de chapa laminada o embutida y soldada mediante travesaños. Su uso, actualmente, se restringe a camiones y furgones debido a su elevada rigidez. En segundo lugar, de columna o en X (véase figura 3.2) el cual es estrecho por el centro dando al vehículo una estructura rígida. En tercer lugar, perimétrico (véase figura 3.3), cuyos largueros soportan la carrocería en la parte más ancha ofreciendo una gran protección en caso de impacto lateral. Por último, tubular (véase figura 3.4), dotado de una estructura en celosía sobre la que se atornillan las chapas exteriores de la carrocería. Se usa mayoritariamente en los vehículos de competición ya que la función que cumple es meramente estética y aerodinámica.



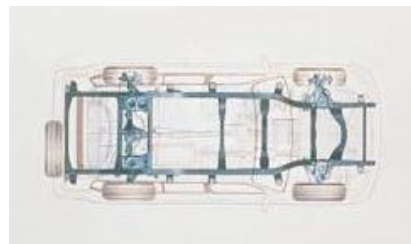
**Figura 3.1.** Bastidor en H

## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

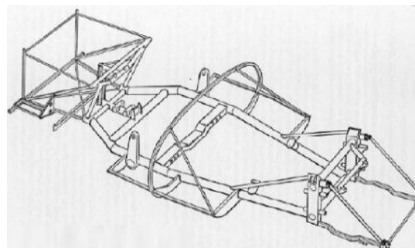
---



**Figura 3.2.** Bastidor en X



**Figura 3.3.** Bastidor perimétrico



**Figura 3.4.** Bastidor tubular

### ➤ Carrocería

La carrocería encierra un conjunto constituido por el bastidor y los elementos funcionales dando al vehículo una estética característica [2].

Generalmente está fabricada en chapa de acero y de materiales plásticos resistentes. La carrocería ha de ser lo más ligera y barata posible en relación con la cantidad de espacio que hay en su interior. Es por eso que en cada zona se utilizan distintos materiales.

Actualmente se busca alta eficiencia y confortabilidad, mejorar el comportamiento aerodinámico, reducir el consumo de carburante y aumentar el aislante para disminuir los ruidos generados durante la marcha. Existen cuatro tipos de carrocería:

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

#### ○ Chasis con carrocería separada

Soporta los órganos mecánicos y puede rodar sin carrocería. La carrocería constituye un conjunto independiente con su propio piso, sus accesorios y su instalación eléctrica (véase Figura 3.5). Prácticamente no se usa en turismos.

#### ○ Plataforma con carrocería separada

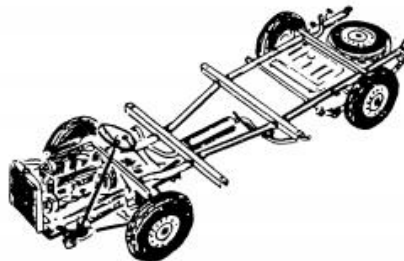
La plataforma es un chasis aligerado formado por la unión de varios elementos soldados entre sí que puede circular sin carrocería debido a que soporta los órganos mecánicos y el piso del vehículo (véase Figura 3.6).

#### ○ Carrocería monocasco

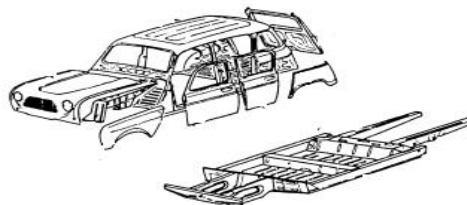
Está formado por un chasis aligerado con su propio piso. Al ser un solo componente unido entre sí por medio de soldaduras las partes constitutivas de la carrocería participan en la resistencia del conjunto (véase figura 3.7).

#### ○ Carrocería autoportante

Un conjunto de piezas unidas entre sí por medio de soldadura por puntos forman la carrocería completa del vehículo. Posee elementos externos como aletas, capot, paragolpes, etc. (Véase Figura 3.8). Es el utilizado para la gran mayoría de los turismos.



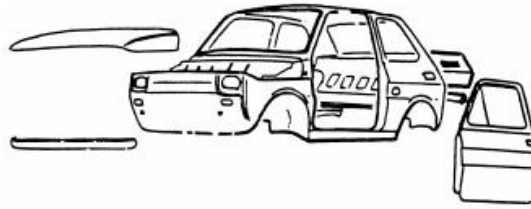
**Figura 3.5.** Plataforma con carrocería separada



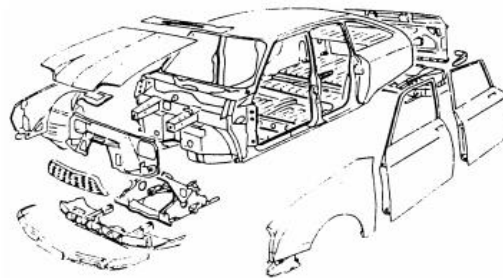
**Figura 3.6.** Plataforma con carrocería separada

## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---



**Figura 3.7.** Carrocería monocasco



**Figura 3.8.** Carrocería autoportante

### 3.1.2 Motor

El motor es una máquina que se encarga de transformar la energía en desplazamiento del vehículo. Actualmente la tecnología da un excelente rendimiento y bajos consumos tanto de gasolina como de diesel [3].

La tendencia es la construcción de motores cada vez más potentes y con cilindradas más pequeñas para disminuir los consumos y la contaminación.

Existen muchos tipos de motores pero los utilizados en vehículos en su mayoría son los térmicos. Estos transforman la energía química del carburante en energía térmica la cual se transforma en energía mecánica. Para la realización de la primera conversión hay dos clasificaciones:

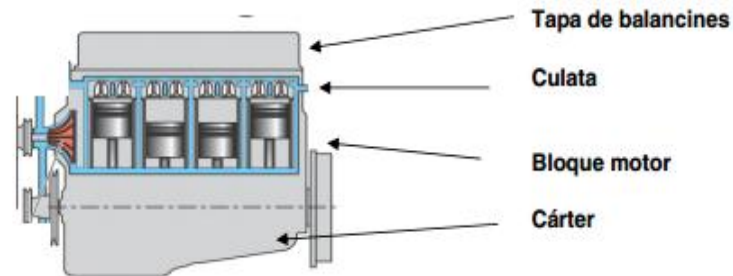
- Motores de encendido provocado por una chispa, también se denominan motores de gasolina ya que es el carburante que utilizan.
- Motores de encendido por compresión, también se llaman motores diesel y el combustible que utilizan es el gasóleo.

Está formado por una parte exterior, que tiene la misión de alojar, sujetar y tapar a otros elementos (véase Figura 3.9); y por otra parte, formada de los elementos móviles que transforman la energía del carburante en trabajo (véase Figura 3.10).

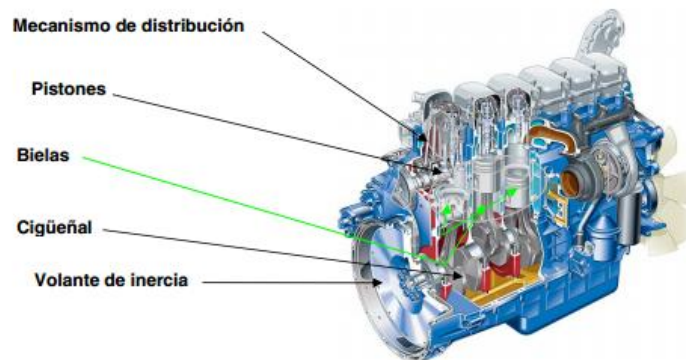


### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---



**Figura 3.9.** Parte exterior de un motor



**Figura 3.10.** Partes móviles del motor

El ciclo de combustión de un motor es el conjunto de operaciones que ocurren en un cilindro desde que entra la mezcla carburada hasta que se retiran los gases de escape.

Existen motores de cuatro tiempos cuyas fases son admisión, compresión, explosión y escape (véase Figura 3.11) [4] o de dos tiempos en la que se llevan a cabo las mismas fases pero en menos recorridos del pistón (véase Figura 3.12)[5].

## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

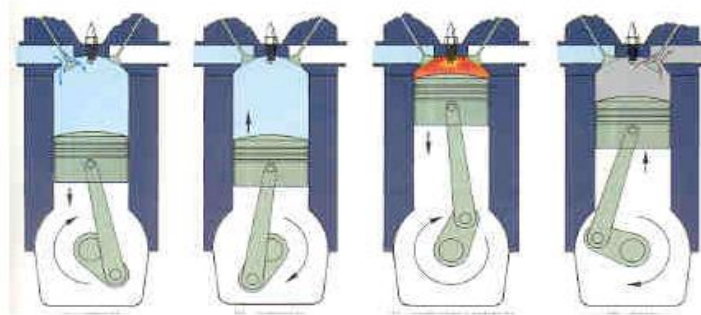


Figura 3.11. Motor de 4 tiempos

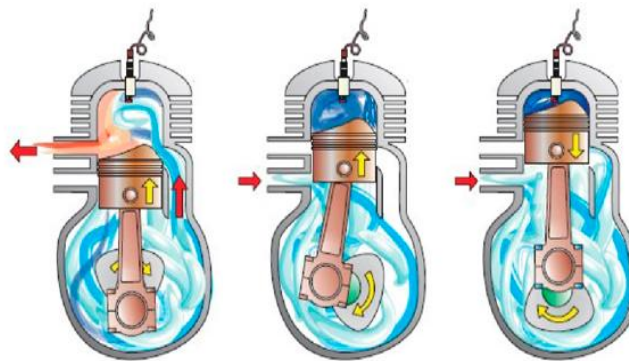


Figura 3.12. Motor de 2 tiempos

### 3.1.3. Equipo eléctrico

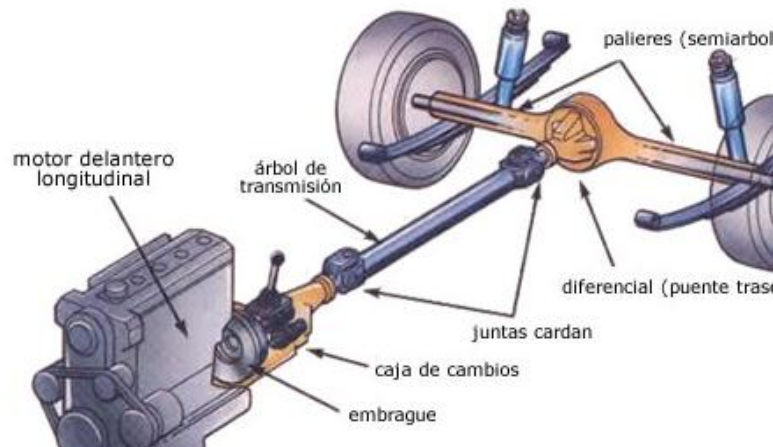
Los componentes eléctricos están agrupados en circuitos e interconexiones y se encargan de transformar la energía eléctrica en otras clases de energía según las necesidades requeridas [3]. Los elementos eléctricos son la batería, el generador, el motor de arranque y los accesorios.

### 3.1.4. Transmisión

El sistema de transmisión es el conjunto cinemático encargado de trasladar la energía del cigüeñal a las ruedas, pudiendo variar la relación de transmisión entre ambos elementos. Se usan tres tipos de construcciones [6]:

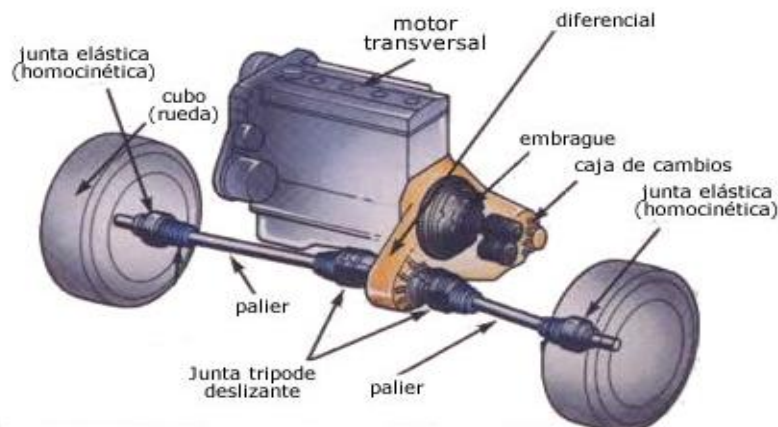
- Motor delantero y propulsión trasera: el motor está colocado en el eje delantero y el eje trasero es el eje motriz (véase Figura 3.13).

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL



**Figura 3.13.** Motor delantero y propulsión

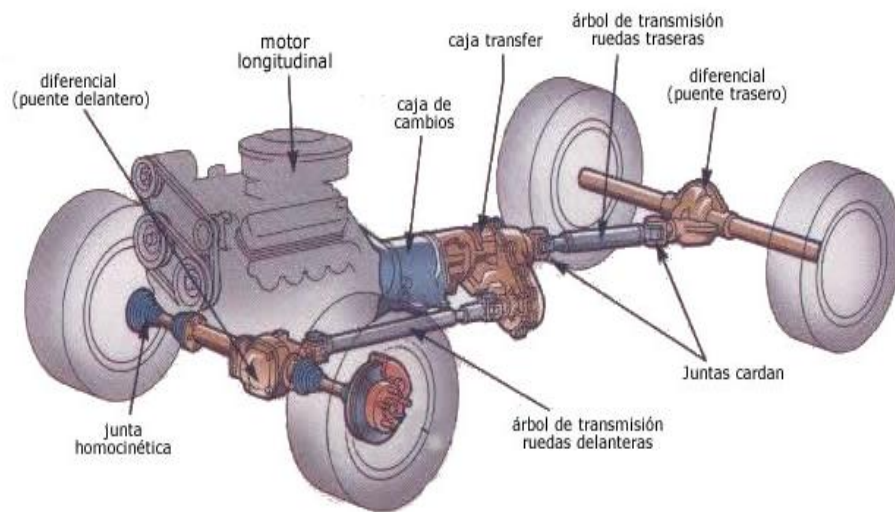
➤ Motor y propulsión traseros o motor y tracción delanteros: la transmisión se realiza directamente desde la caja de cambios a las ruedas (véase Figura 3.14).



**Figura 3.14.** Motor delantero y tracción

➤ Tracción en las cuatro ruedas: la transmisión del movimiento a las ruedas se complica ya que se necesitan más elementos, como otro árbol de transmisión, que transmite el movimiento generalmente a las ruedas traseras, acompañándose de otro diferencial (véase Figura 3.15).

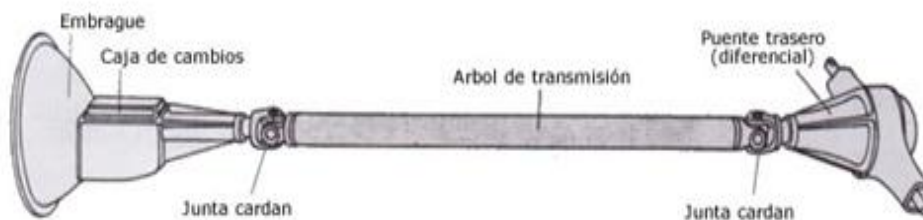
### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL



**Figura 3.15.** Transmisión total

Los elementos que forman el sistema son:

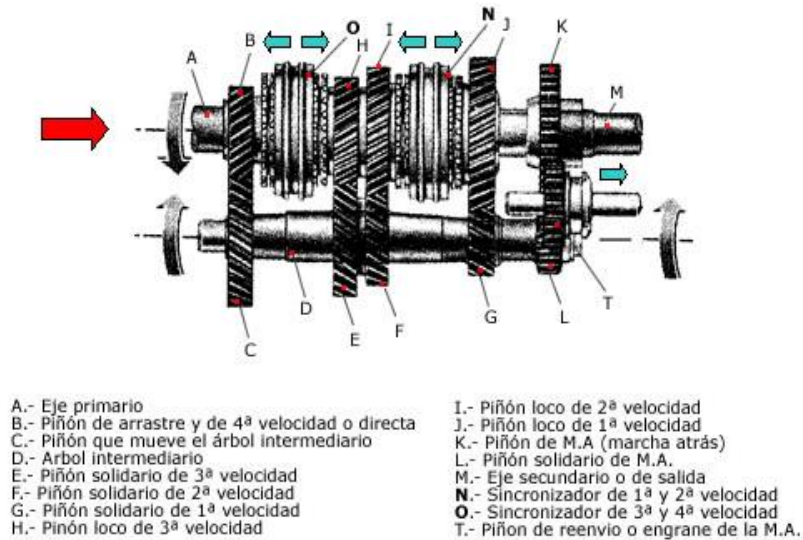
- Árbol de transmisión: transmite el movimiento de la caja de velocidades al mecanismo cónico diferencial (véase Figura 3.16).



**Figura 3.16.** Árbol de transmisión

- Caja de velocidades: disminuye o aumenta la relación de transmisión en función de las necesidades (véase Figura 3.17).

## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL



**Figura 3.17.** Caja de velocidades

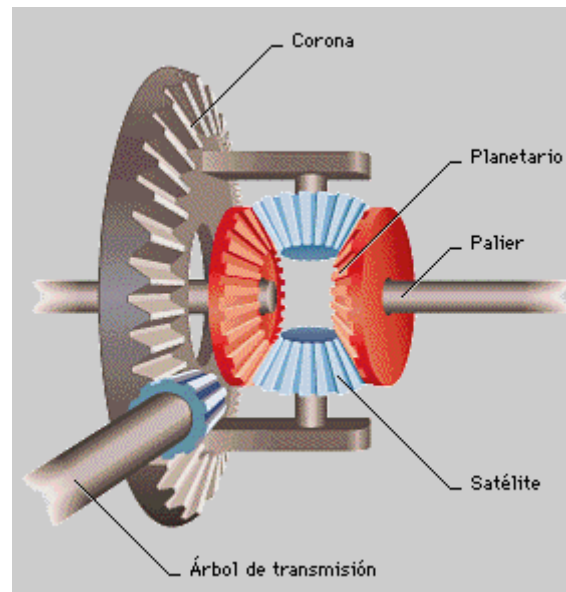
### ➤ Mecanismo cónico diferencial:

El grupo cónico mantiene constante la suma de velocidades de las ruedas motrices permitiendo que puedan girar a distintas velocidades lo que permite que el vehículo pueda realizar curvas (véase Figura 3.18) [3].

El grupo cónico está formado por el piñón de ataque y la corona. Es el encargado de:

- Transmitir el movimiento desde el árbol de transmisión al diferencial
- Desmultiplicar, con una relación de desmultiplicación fija, las vueltas de giro del eje secundario de la caja de velocidades.

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL



**Figura 3.18.** Mecanismo cónico diferencial

- Juntas: unen elásticamente elementos.
- Semi-árboles de transmisión: transmiten el movimiento del grupo cónico-diferencial a las ruedas.
- Embrague: sirve para transmitir el movimiento del motor al sistema de transmisión. Este cumple las funciones de acoplamiento y desacoplamiento y está situado entre el volante de inercia y la caja de velocidades y ha de transmitir el movimiento de manera progresiva y elástica para que no se produzca la rotura de ningún elemento. Existen tres tipos de embragues [7]:

○ Embrague de fricción. Consta a su vez de cuatro partes (véase Figura 3.19) [3]:

1- Disco de embrague: está constituido de un disco de acero unido a un cubo estriado mediante muelles helicoidales. En el centro del disco se encuentra dicho cubo estriado el cual permite que se transmita el movimiento del disco a la caja de velocidades. Sobre el disco existen unos forros en forma de anillo fabricados de un material con un alto coeficiente de rozamiento y resistente al calor y al desgaste.

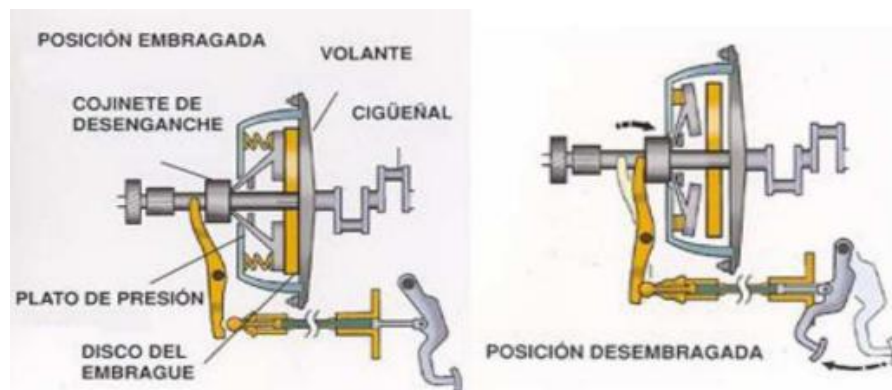
2- Plato de presión: es una pieza que va montada entre el disco del embrague y la carcasa del embrague unida elásticamente a él, de tal forma que al aplicar una presión sobre este elemento elástico se oprime el disco del embrague contra el volante de inercia, transmitiendo así el giro del motor.

3- Carcasa: encierra exteriormente el embrague para protegerlo y sujetar el mecanismo de presión y accionamiento.



### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

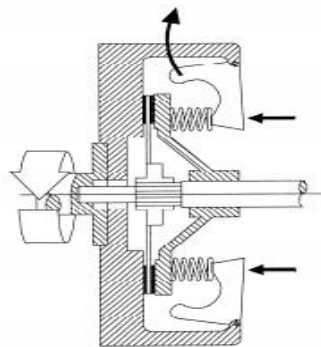
4- Mecanismos de presión: son los encargados de presionar el plato de presión contra el disco de fricción para que este quede oprimido y giren solidariamente con el volante de inercia.



**Figura 3.19.** Embrague de fricción

#### ○ Embrague automático

El conductor no necesita presionar el embrague pues los elementos de inicio de marcha y de cambio de velocidad los realizan por sí mismos (véase Figura 3.20).



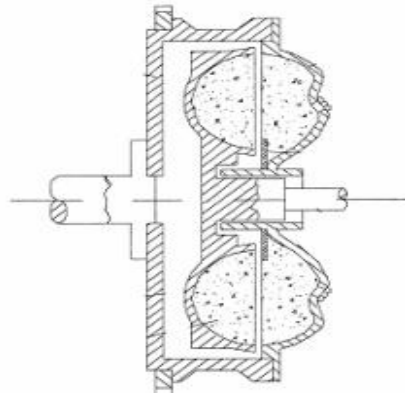
**Figura 3.20.** Embrague automático

#### ○ Embrague hidráulico

Emplea generalmente como fluido aceite y se basa en la transmisión de energía de unos álabes, unidos al volante motor, a otros álabes unidos al eje primario de la caja de velocidades (véase Figura 3.21).

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

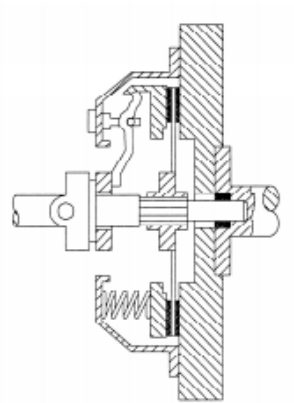
---



**Figura 3.21.** Embrague hidráulico

#### ○Embrague de muelles helicoidales

La fuerza se efectúa por medio de una serie de muelles que realizan el esfuerzo necesario para aprisionar al disco del embrague entre el volante motor y el plato presión (véase Figura 3.22).

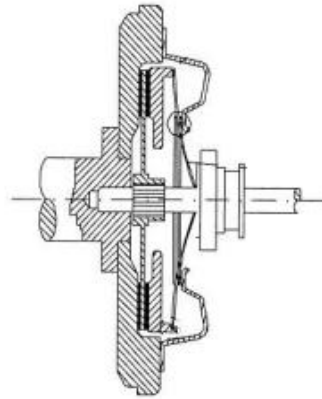


**Figura 3.22.** Embrague de muelle helicoidal

#### ○Embrague de diafragma

Está formado por un diafragma elástico de acero que se comporta como un muelle evitando ser afectado por la fuerza centrífuga y logra así una presión más uniforme (véase Figura 3.23).

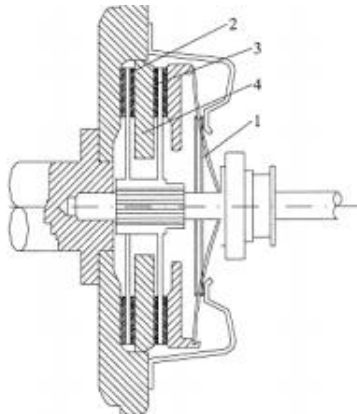




**Figura 3.23.** Embrague de diafragma

○ Embrague de discos múltiples

Surge cuando existen problemas de tamaño en el motor (véase Figura 3.24).



**Figura 3.24.** Embrague de discos múltiples

○ Embrague electromagnético

Funciona por la acción electromagnética de una masa polar instalada en el volante de inercia formada por una bobina alimentada por una gran corriente eléctrica que sustituye al plato de presión de un embrague tradicional (véase Figura 3.25).



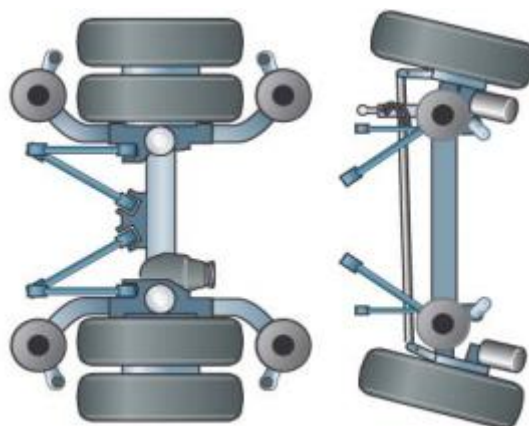
**Figura 3.25.** Embrague electromagnético

### 3.1.5 Rueda

La rueda es el elemento del automóvil que toma contacto con el terreno y actúa de unión entre el suelo y el vehículo (véase Figura 3.26) [3].

Deben cumplir ocho funciones básicas:

- Sustener la masa del vehículo haciendo posible su manejo con el menor esfuerzo posible.
- Convertir el movimiento de giro en movimiento de avance del vehículo.
- Ofrecer una fuerte resistencia al deslizamiento sobre el suelo, sobre todo en frenada.
- Dirigir al automóvil para poder efectuar los cambios de dirección.
- Absorber y amortiguar los choques o golpes por irregularidades del terreno.
- Liberar el calor producido en los frenos.
- Han de ser ligeras para que la masa no suspendida del vehículo sea mínima.
- Deben presentar un alto grado de seguridad.



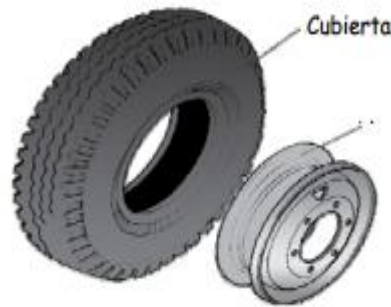
**Figura 3.26.** Distintos montajes de las ruedas

## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

Están compuestos de varias partes (véase Figura 3.27):

- Llanta
- Cubierta



**Figura 3.27.** Elementos de la rueda

Para la identificación de los tipos de rueda se utiliza una nomenclatura que va impresa en el flanco y describe las características del mismo.

### 3.1.6. Freno

La misión principal de los frenos es detener y mantener la parada del vehículo (véase Figura 3.28) [8].

Se encarga de [9]:

- Eficacia: distancia de parada mínima con una respuesta rápida.
- Estabilidad: afectar lo menos posible la trayectoria del vehículo.
- Progresividad: esfuerzo de frenado proporcional al esfuerzo del conductor.
- Confort: esfuerzo mínimo a realizar por el conductor.

Está formado por tres circuitos:

- Circuitos de frenos: compuesto a su vez de tres circuitos:
  - Circuito principal de frenos

El circuito principal es accionado por un mando de pedal que se encuentra en el interior del habitáculo y transmite la fuerza aplicada por el conductor a los elementos de frenado de las ruedas. La transmisión de esfuerzos se realiza a través de un circuito hidráulico o neumático, aprovechando la energía transmitida por estos fluidos a través de un sistema multiplicador de esfuerzos, para que llegue a las ruedas con la fuerza necesaria para detener el vehículo.

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

#### ○Circuito auxiliar de frenos

El circuito auxiliar consiste en un mecanismo de freno mecánico, llamado freno de mano, accionado desde el interior del vehículo de forma que, una vez fijado el mando, las ruedas queden bloqueadas para evitar el deslizamiento.

#### ○Freno complementario de asistencia

En vehículos pesados de gran tonelaje suele instalarse un tercer freno de asistencia, cuya misión es colaborar y actuar conjuntamente con el circuito principal para evitar que, por el continuo uso, los frenos pierdan efectividad.

#### ➤ Sistemas de mando de frenos

Los sistemas de mando de frenos tienen como misión:

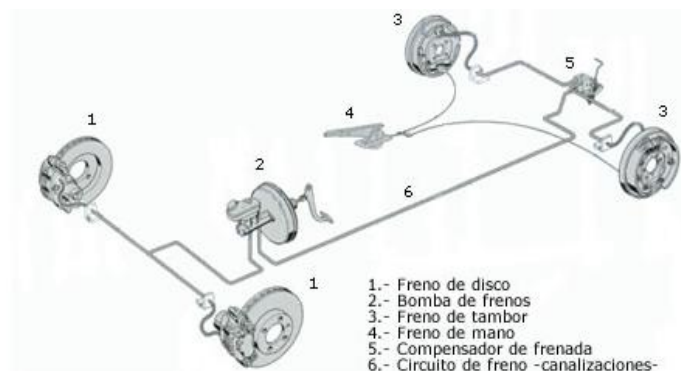
- Verificar el correcto funcionamiento de la palanca y de los cables de freno de estacionamiento.

- Verificar el buen estado del pedal de freno (fijación, goma, contactores de stop, muelles de recuperación).

- Controlar el estado correcto (descaste, torsión, fijación, rozamiento) del conjunto del circuito (flexibles, racores y canalizaciones).

#### ➤ Compensadores de frenado

El compensador de frenado es un sistema que verifica que la carga sobre el tren trasero del vehículo es correcta, registra la presión del sistema de frenada en las cuatro ruedas al accionar el freno el conductor y visualiza las curvas de evolución en tiempo real [10] (véase Figura 3.28).



**Figura 3.28.** Esquema básico de un circuito de frenos

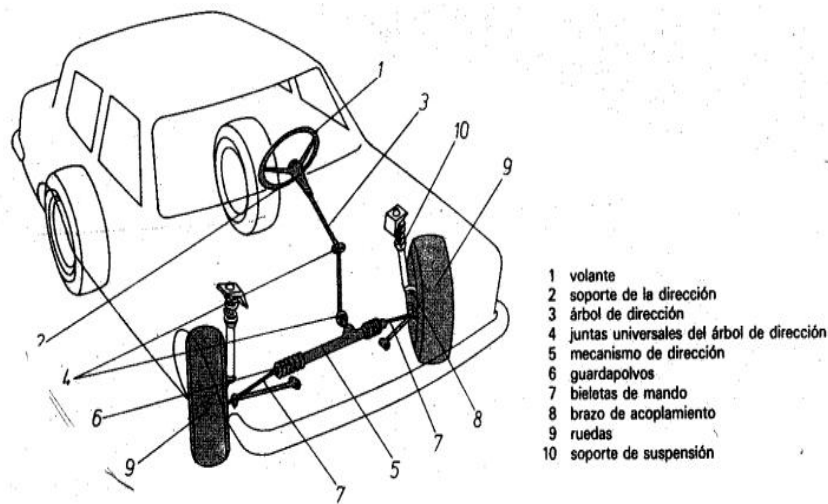
## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

### 3.1.7. Dirección

La dirección es un conjunto de mecanismos que tienen como misión orientar las ruedas delanteras del vehículo para que este tome la trayectoria que el conductor desee (véase Figura 3.29) [10].

Dispone de un mecanismo desmultiplicador en los casos más sencillos, y de servomecanismos de asistencia en los casos de vehículos pesados, que sirven para disminuir el esfuerzo que tiene que realizar el conductor.

Las cualidades que debe cumplir el sistema de dirección son:



**Figura 3.29.** Sistema de dirección

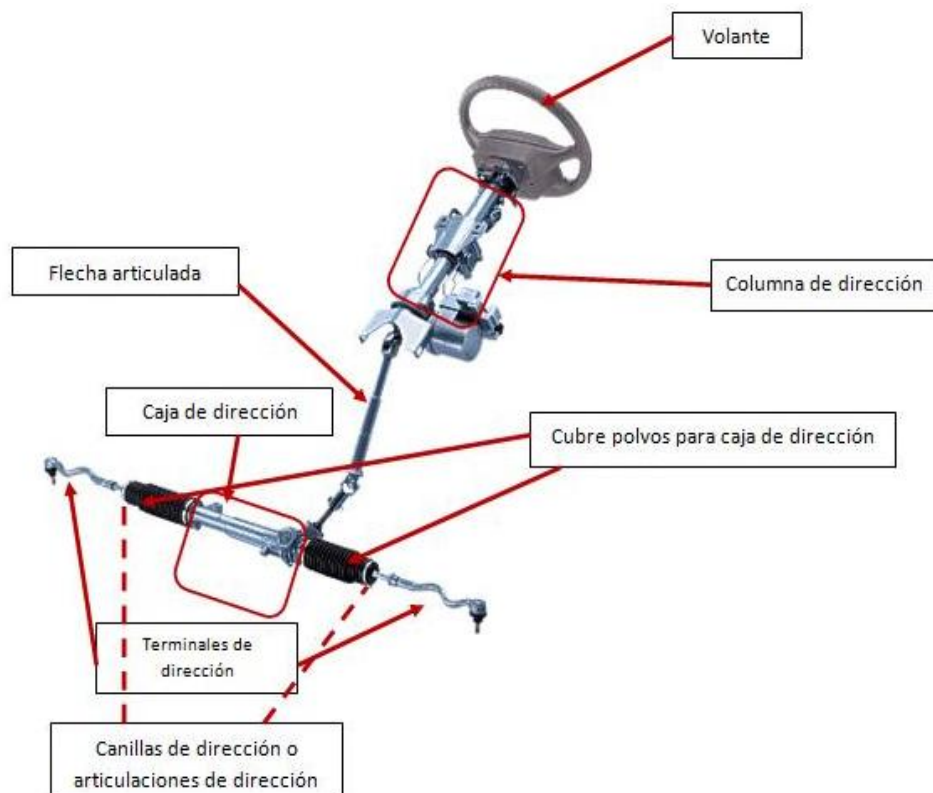
- Seguridad: depende de la fiabilidad del mecanismo, los materiales usados y el movimiento efectuado
- Suavidad: para hacer mantener una conducción agradable en la circulación
- Precisión: se consigue si se evita una dirección demasiado dura o demasiado blanda y evitar así que el vehículo siga una trayectoria errónea.
- Irreversibilidad: se debe permitir la transmisión del giro del volante a las ruedas pero no las oscilaciones del terreno al volante.

Los componentes del sistema de dirección son (véase Figura 3.30) [12]:

- Volante: desde donde el conductor dirige la trayectoria del vehículo

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

- Columna de dirección: enlaza el volante con la caja de dirección.
- Caja de dirección: recibe el movimiento del volante y la barra, y lo reparte entre las ruedas a través de engranajes. Puede ser:
  - Caja de dirección de bolas reticulantes
  - Caja de dirección de cremallera
- Biela (flecha articulada): pieza ubicada a la salida de la caja de dirección encargada de unir la caja de dirección con la varilla central. Este elemento es exclusivo de la caja de dirección de bolas reticulantes.
- Varilla central (articulaciones de dirección): recibe el movimiento de la caja de dirección y lo transmite a los terminales de dirección.
- Terminales de dirección: son elementos elásticos que absorben las irregularidades del suelo y se unen con cada rueda direccional.
- Cubre-polvos



**Figura 3.30.** Componentes del sistema de dirección

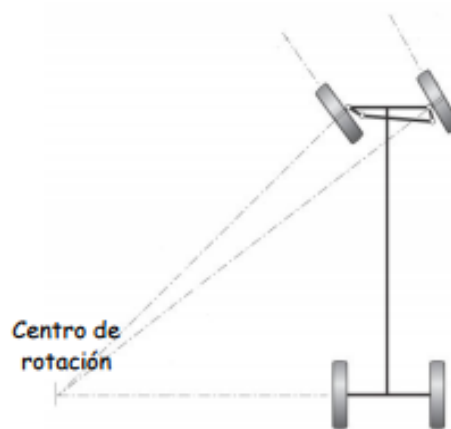
### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

En el sistema de dirección se distinguen dos tipos de geometrías [3]:

➤ Geometría de giro

Al girar un vehículo la trayectoria de cada una de las ruedas directrices es distinta debido a que el radio de curvatura varía. Para que se pueda efectuar la trayectoria correctamente todas las ruedas han de tener un mismo centro de rotación. Para conseguir esto se colocan las bieletas con una cierta inclinación tal que la prolongación de los ejes de las bieletas coincidan con el centro del eje trasero y al tomar la curva los ejes de las ruedas coincidan en un mismo centro (véase Figura 3.31).



**Figura 3.31.** Geometría de giro

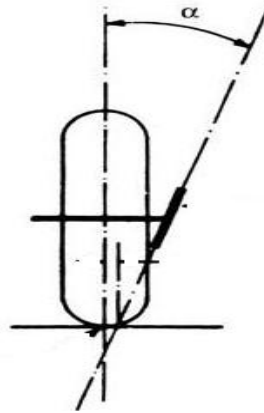
➤ Geometría de las ruedas

Para que el sistema de dirección funcione han de cumplirse cuatro condiciones geométricas [13]:

○ Ángulo de salida

El ángulo de salida es el ángulo que forma la prolongación del eje del pivote, sobre el que gira la rueda para orientarse, con la prolongación del eje vertical que pasa por el centro de apoyo de la rueda. Al inclinar el pivote, se consigue un esfuerzo menor para conseguir el giro deseado (véase Figura 3.32).

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

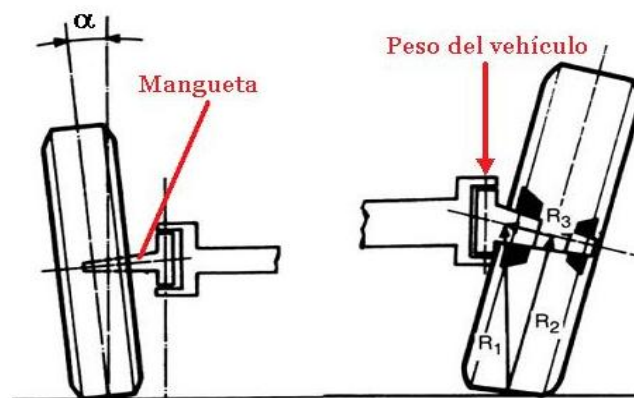


**Figura 3.32.** Ángulo de salida

○ Ángulo de caída (véase Figura 3.33)

El ángulo de caída es el ángulo que forma la prolongación del eje de simetría de la rueda con la vertical que pasa por el centro de apoyo de la misma. Este ángulo se consigue dando al eje de la mangueta una cierta inclinación con respecto al plano horizontal. Así se desplaza el peso del vehículo que gravita sobre este eje hacia el interior de la mangueta y se disminuye el empuje lateral de los cojinetes sobre los que se apoya la rueda (véase Figura 3.33). Puede ser de tres tipos:

- 1- Positiva: inclinación en la cual la parte superior de las ruedas está más separada que la parte inferior, es decir la parte superior está inclinada hacia afuera.
- 2- Negativa: inclinación en la cual la parte inferior de las ruedas está más separada que la parte superior, es decir la parte superior está inclinada hacia el interior.
- 3- cero: la rueda está situada en la vertical.



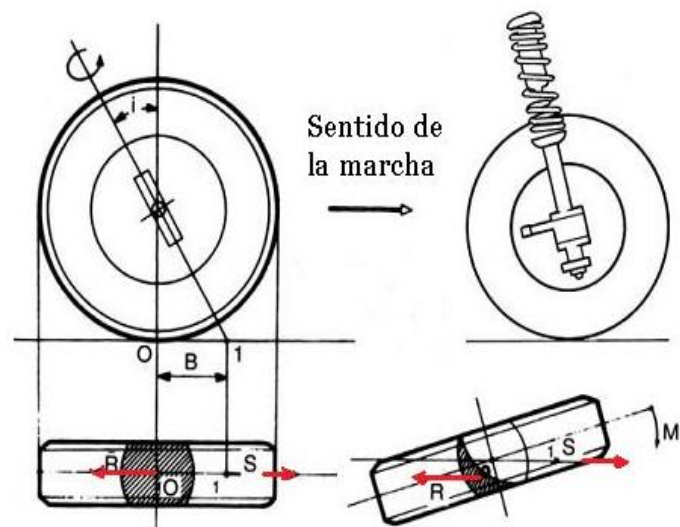
**Figura 3.33.** Ángulo de caída



### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

#### ○Ángulo de avance

El ángulo de avance es el ángulo que forma la prolongación del pivote con el eje vertical que pasa por el centro de la rueda en el sentido de la marcha. La idea es que la prolongación del eje del pivote toque el suelo por delante del punto de contacto de la rueda con el terreno. Así, aparece un efecto remolque en las ruedas, ya que las fuerzas que intervienen “tiran” desde puntos de aplicación diferentes cuando la rueda se encuentra en pleno giro. Esto ayuda a poner rectas las ruedas cuando acabamos de girar y cuando encontramos irregularidades en el terreno (véase Figura 3.34).



**Figura 3.34.** Ángulo de avance

#### ○Ángulo de convergencia (véase Figura 3.35)

Al conjugar las diferentes cotas de la dirección, se puede encontrar con que las ruedas delanteras no sean completamente paralelas, sino que convergen o divergen dependiendo de las necesidades dinámicas del vehículo en materia de suspensiones, fuerzas del motor sobre las ruedas y resistencia al avance. La idea es que cuando el vehículo se mueva las ruedas vayan tan paralelas como sea posible para evitar la inestabilidad de la dirección y asegurar la estabilidad del vehículo. Una convergencia o divergencia excesiva se manifestaría por la propia ingobernabilidad del vehículo y por el desgaste irregular en las bandas de rodadura de los neumáticos.

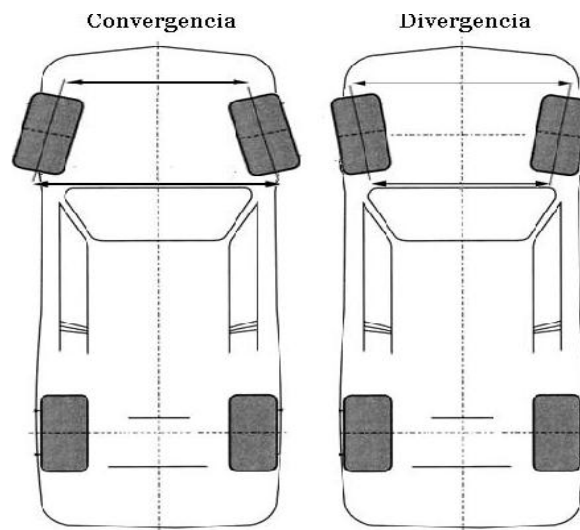


Figura 3.35. Ángulo de convergencia

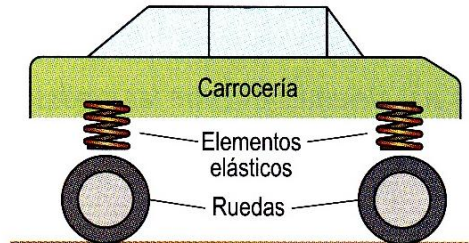
### 3.1.8. Suspensión

#### **3.1.8.1. Introducción a la suspensión**

La idea tradicional de que un objeto está suspendido de otro viene a ser que está colgando del mismo. Sin embargo, esta apreciación del concepto suspendido no es del todo correcta. Se deduce por tanto, que un objeto está suspendido de algo, cuando ese “algo” impide que llegue a estar en contacto con el suelo. En el caso del automóvil, la carrocería está suspendida de las ruedas, mediante la interposición de elementos elásticos, que dan lugar al llamado sistema de suspensión [14].

El funcionamiento básico de la suspensión, consiste en permitir los movimientos de aproximación y alejamiento de las ruedas y la carrocería, mediante la deformación del elemento elástico intercalado entre las mismas. Al movimiento de aproximación se le denomina de compresión, mientras que al del alejamiento se conoce como de extensión (véase figura 3.36).

A la hora de estudiar la suspensión, debe tenerse siempre muy presente la función de los neumáticos en el vehículo pues la tarea que realizan los neumáticos de absorber las irregularidades del terreno de menor envergadura permite diseñar la suspensión, de tal forma que su funcionamiento se centre en las restantes funciones que cumple, efectuándose con mayor eficacia.



**Figura 3.36.** Interposición de elementos elásticos entre las ruedas y la carrocería

### 3.1.8.2. Requisitos a cumplir

El sistema de suspensión ha de cumplir una serie de requisitos para desarrollar satisfactoriamente las funciones que tiene asignado en el vehículo:

- Confortabilidad.
- Reducir la incidencia de las fuerzas sobre la carrocería.
- Asegurar el contacto permanente de las ruedas con el suelo.
- Aumentar la estabilidad.
- Mejorar la direccionalidad.
- Incrementar la adherencia de los neumáticos.
- Mantener y adecuar las cotas de la dirección.

### 3.1.8.3. Elementos de suspensión

Existen varios tipos de elementos de suspensión:

#### 3.1.8.3.1. Elementos elásticos

La función de los elementos elásticos es soportar el peso del vehículo, permitiendo, mediante su deformación, los movimientos de compresión y extensión. La característica principal de todo elemento elástico es su tarado. El concepto de tarado es la resistencia que posee un elemento elástico a la deformación. Se evalúa en función del peso, y por tanto la forma necesaria para su deformación por unidad de longitud (véase figura 3.37). Cuanto más “blando” (menor tarado) sea un elemento elástico, mayor será el recorrido entre las ruedas y la carrocería en los movimientos oscilatorios de la suspensión. Es decir, la altura del vehículo sufrirá mayores variaciones lo que provoca que su frecuencia (número de oscilaciones en el tiempo) sea menor.

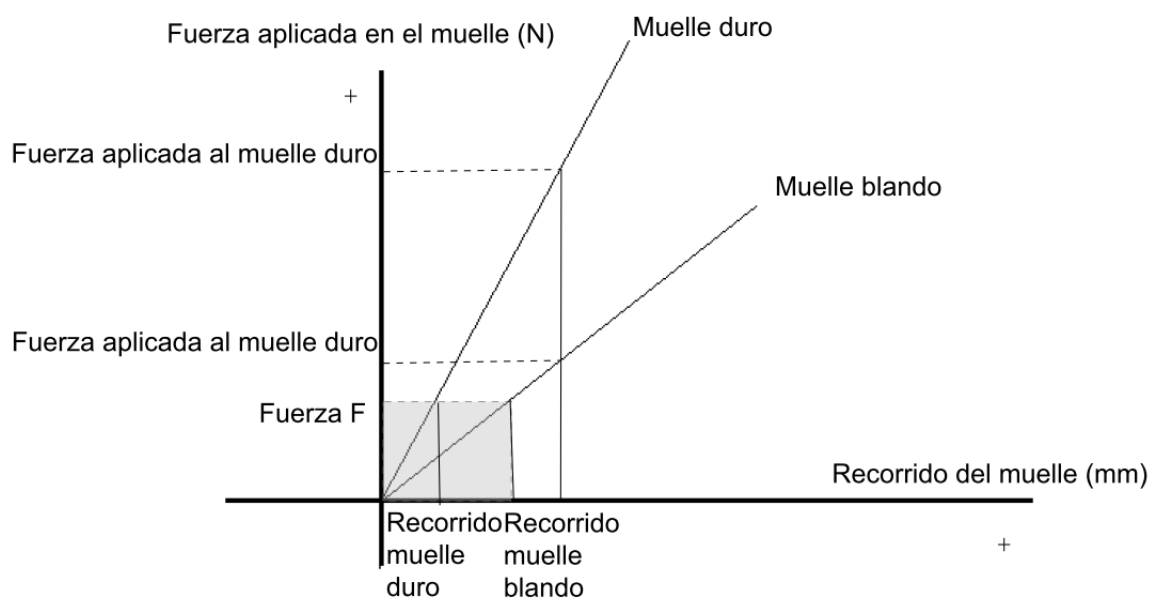
Por el contrario, un elemento elástico más duro, hará que el recorrido de las oscilaciones sea más corto, aumentando por tanto su frecuencia (véase figura 3.38).

Cuanto más blando sea el tarado de los elementos elásticos de la suspensión, mayor será el confort de los ocupantes en el vehículo ya que al presentar mayor facilidad

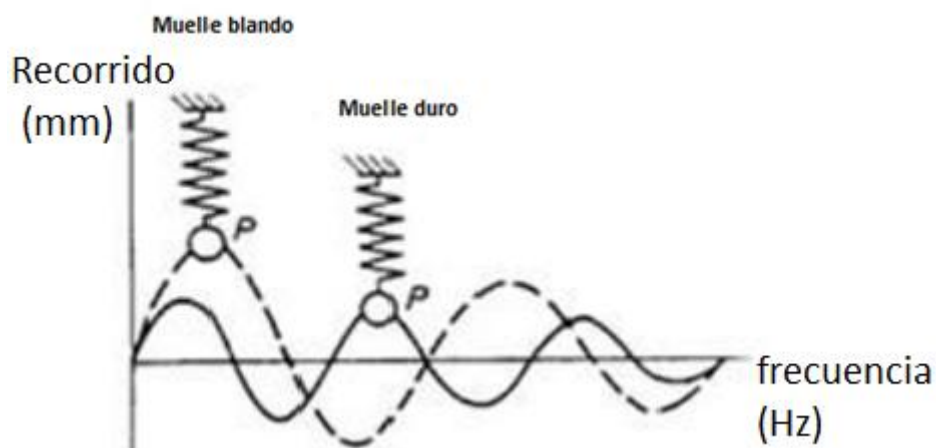
### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

para la deformación, absorberá mejor las irregularidades del terreno. En cambio, la inclinación de la carrocería al cambiar de trayectoria, será mucho más acusada dado que se deforman con mayor facilidad, por lo que la estabilidad será menor.

Por el contrario, un tarado más duro favorece la estabilidad, al presentar mayor resistencia a la inclinación de la carrocería en curvas, pero en cambio absorberá peor las irregularidades del terreno, disminuyendo el confort. Cuanto más duro sea el tarado de la suspensión menores serán los movimientos de balanceo y cabeceo, siendo por tanto mayor la estabilidad.



**Figura 3.37.** Gráfica recorrido-fuerza en resortes de distinto tarado



**Figura 3.38.** Influencia del tarado en el recorrido y la frecuencia de las oscilaciones

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

Existen varios tipos de elementos elásticos:

➤ Muelle helicoidal

El muelle helicoidal es el tipo de elemento elástico más empleado. Está formado por un hilo de acero dispuesto en espiral continua y por tanto en forma de hélice. En la suspensión del vehículo el muelle trabaja siempre a compresión, es decir, disminuye su longitud cuando incide sobre él una fuerza. Al comprimirse, el hilo continuo se revira o torsiona, para poder disminuir su longitud.

Por sus características, el muelle helicoidal presenta las siguientes particularidades:

- Resulta ideal para el tren delantero, pues no interfiere en el giro de las ruedas en su orientación directriz.
- Al estar formado por una única pieza destaca por su sencillez.
- Su configuración permite disponerlo en múltiples posiciones, integrándose fácilmente en la estructura del vehículo.
- Su mayor inconveniente, además de su tarado constante, es la falta de rigidez transversal, que obliga a emplear componentes específicos para el guiado y sujeción de la rueda.

Los factores que determinan el tarado del muelle son:

- Material empleado en su fabricación.
- Longitud (a mayor longitud menor tarado y viceversa).
- Diámetro de espiras, referido al diámetro máximo de la circunferencia que forma el hilo al enrollarse en espiral (a mayor diámetro, menos tarado).
- Diámetro del hilo (a mayor diámetro, mayor tarado).
- Paso o distancia entre espiras consecutivas (a mayor paso, tarado más blando).

➤ Barra de torsión

La barra de torsión es una barra circular de acero, dispuesta de forma rectilínea sujeta por un extremo a la carrocería y por el otro a la rueda, a través de un brazo o triángulo. Así, cuando la rueda oscila, el brazo arrastra a la barra, que a su vez tiende a girar sobre su eje, pero al ir sujeta a la carrocería por el otro extremo, no puede hacerlo, por lo que se revira. La propia elasticidad, hace que retorne a su posición inicial. Se dispone como mínimo una barra por rueda.

Pueden ubicarse en sentido longitudinal, como ocurre cuando se emplean en el eje delantero, si bien hoy en día solo se utilizan para el eje trasero, emplazarse de modo transversal. Por su sistema de fijación admiten la posibilidad de variar su precarga y por

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

tanto la altura del vehículo. Para ello, van fijadas mediante estrías, o bien disponen de excéntricas en su fijación a la carrocería.

Poseen la ventaja de su sencillez y facilidad de ubicación que hace que sean muy empleadas en turismos del segmento medio-inferior, siempre en el eje trasero. Su tarado depende de su longitud, el diámetro del hilo y el tipo de acero empleado.

#### ➤ Ballesta

La ballesta está formada por una serie de hojas planas de acero, y en algún caso de fibra de vidrio. Dichas hojas se disponen superpuestas, con longitud decreciente, de arriba a abajo. En otros casos, la hoja más larga, denominada maestra, se sitúa en la parte inferior, denominándose como ballesta invertida.

Las hojas disponen de propiedades elásticas y están unidas en su parte central por un pasador denominado capuchino. A su vez, para mantenerlas alineadas, cuentan con unas abrazaderas, denominadas abarcones. En la mayoría de los casos también se emplean para fijar la ballesta al puente o eje.

La hoja maestra va fijada a la carrocería mediante una articulación, denominada gemela, con la que se absorben las variaciones de longitud que sufre al deformarse. El retardo depende del grosor de las hojas, el material de las mismas, el número de hojas y su longitud.

En turismos apenas es utilizada hoy en día, disponiéndose, en los últimos vehículos que las emplean de modo transversal, con los extremos fijados a los brazos de suspensión.

Las ventajas que presenta son:

- Robustez.
- Rigidez transversal que permite prescindir de elementos de guiado y sujeción.
- Posibilidad de reparación y adaptación del tarado, mediante el añadido o supresión de hojas adicionales.

Las desventajas que posee son:

- Complejidad por el elevado número de componentes de que dispone.
- Necesidad de mantenimiento ya que hay que limpiar y engrasar periódicamente las hojas y articulaciones.
- Elevado peso.
- Recorrido de suspensión limitado.

## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

### ➤ Barra estabilizadora

La barra estabilizadora es un elemento elástico que tan solo actúa en curva, cuando la inclinación del vehículo produce diferencias de altura entre ambas ruedas de un mismo eje, respecto a la carrocería. Tiene por tanto una función anti-balanceo. Lo normal es emplear una en cada eje, aunque hay vehículos que prescinden de la misma en alguno de sus ejes.

Está formada por una barra de torsión solidaria a ambas ruedas de un mismo eje, dispuesta por tanto en sentido transversal, y fijada mediante uniones basculantes a la carrocería. Debe destacarse que la barra puede girar libremente en estas uniones a la carrocería, sirviéndolas estas tan solo de apoyo, a diferencia de las barras de torsión empleadas como elementos elásticos propiamente dichos.

Así, si ambas ruedas oscilan a la vez, la barra no actúa, limitándose a pivotar en sus fijaciones de la carrocería. Por ello, en cierto modo limita la independencia de oscilación entre ambas ruedas, si bien sus efectos en este aspecto apenas se dejan notar, puesto que en un bache o realce tan solo es torsionada desde un extremo, a diferencia de las curvas, en las que se revira de ambos lados, en sentidos opuestos.

Actúa cuando el vehículo se inclina al abordar una curva ya que los extremos de la barra se reviran en sentido contrario, alejándose de la carrocería en el lado interior, y aproximándose a la misma en el lado exterior. En este caso, la resistencia al torsionado se opone a la inclinación de la carrocería.

La unión a las ruedas se efectúa a través del elemento oscilante, brazo o triángulo, o bien directamente a la propia mangueta. En muchos casos dispone de tirantes de reenvío, que permiten su ubicación en un lugar más favorable, sin interferir con otros elementos del vehículo.

En ciertos vehículos, la barra estabilizadora actúa como tirante de reacción longitudinal, permitiendo emplear un brazo de dos puntos sin tirante específico complementario. La presencia de la barra estabilizadora permite emplear un tarado más blando en los elementos elásticos, puesto que disminuye la inclinación de la carrocería, por lo que a igualdad de estabilidad, el confort aumenta.

#### 3.1.8.3.2. Amortiguadores

Los amortiguadores cumplen una función trascendental dentro del sistema de suspensión. Estos elementos, al igual que en los muelles, al deformarse, absorben la energía que se les transmite, de tal modo que cuando cesa la fuerza que les mantiene deformados, dicha energía es devuelta, generando un movimiento oscilante [15].

Puesto que la masa del vehículo interviene en dicha deformación, la energía que posee es muy elevada, por lo que la oscilación se prolongaría en el tiempo excesivamente. Dicha energía se disipará en forma de calor por los rozamientos de los elementos de la suspensión, persistiendo las oscilaciones hasta que se disipase en su totalidad.



### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

Surge, por tanto, la necesidad de eliminar dichas oscilaciones, por los problemas que traerán consigo en cuanto a una disminución de la estabilidad, direccionalidad, pérdida del contacto de las ruedas con el suelo, etc. El confort también se vería resentido, ya que los movimientos oscilatorios del vehículo se transmitirán a los pasajeros.

Los amortiguadores se encargan de eliminar dichas oscilaciones, transformando en calor la energía transmitida a los resortes.

Los más utilizados son de tipo hidráulico, en los que se hace pasar un aceite especial por unos orificios de pequeña sección para que el efecto de laminado que se genera sobre el aceite ralentice las oscilaciones. Como consecuencia, el aceite incrementa su temperatura al transformarse la energía cinética en calorífica.

Dentro de los amortiguadores hidráulicos, los más empleados son los de tipo telescópico en los que un émbolo solidario a un vástago se introduce en el interior de un cilindro.

Cuanto menor sea la sección de estos conductos, más resistencia ofrecen al paso del aceite, siendo por tanto más elevado el efecto de retención y por tanto más elevado será el tarado de los amortiguadores.

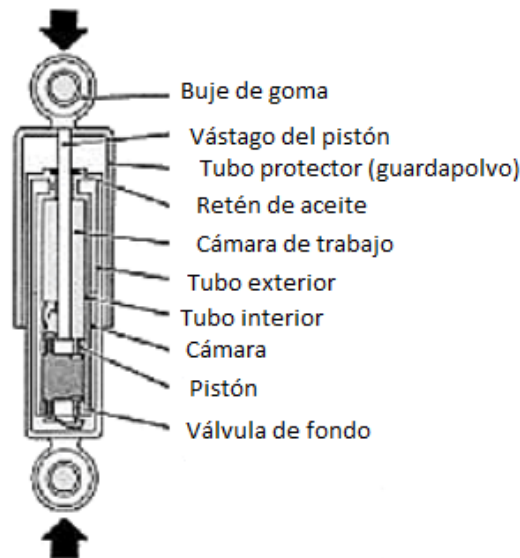
Existen varios tipos de amortiguadores:

➤ Amortiguadores bitubo

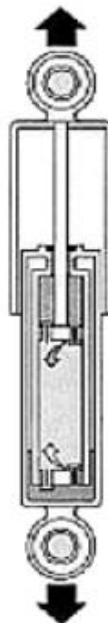
En los amortiguadores bitubo se recurre a disponer una tercera cámara concéntrica con la situada al otro lado del vástago, exterior a ella, y comunicada con la misma mediante válvulas situadas en su parte inferior.

Cuando el émbolo se introduce en el cilindro, el aceite que no cabría en el lado del vástago, pasa a la cámara exterior (véase figura 3.39). En cambio, cuando el émbolo se desplaza en sentido contrario, el aceite de la cámara exterior pasa a la cámara de la que antes ha salido (véase figura 3.40).





**Figura 3.39.** Funcionamiento del amortiguador bitubo a compresión



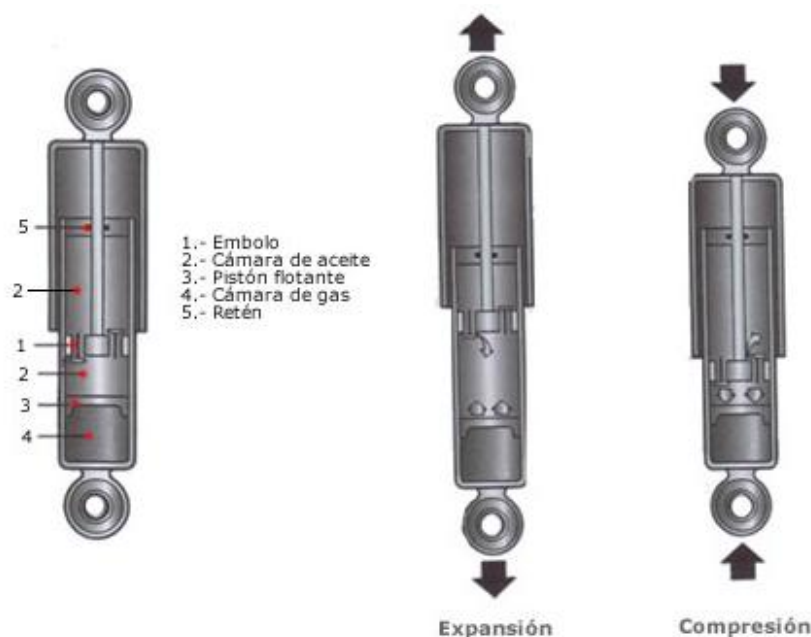
**Figura 3.40.** Funcionamiento del amortiguador bitubo a extensión

➤ Amortiguadores de gas

Para evitar los problemas de diferencia de volúmenes desalojados a ambos lados del émbolo se recurre a montar los amortiguadores llamados de gas, en los que se dispone de una cámara de gas separada mediante un pistón flotante. Dicha cámara suele albergar nitrógeno, aunque en otros casos aloja aire. Esta disposición tiene las siguientes ventajas:

## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

- Permite prescindir de la cámara exterior, puesto que cuando el émbolo se introduce en el cilindro, la diferencia de volúmenes generada por la presencia del vástago es absorbida por la cámara de gas, disminuyendo su volumen, mediante el desplazamiento del pistón flotante (véase figura 3.41).
- Evita la formación de espuma, y por tanto de burbujas, al mantener el aceite sometido a presión. Dichas burbujas generarían problemas de funcionamiento, puesto que disminuiría el efecto de retención, al ser mucho menos viscoso el aire que el aceite.



**Figura 3.41.** Funcionamiento de un amortiguador de gas en ambos sentidos

### 3.1.8.3.3. Elementos de sujeción y guiado

Los elementos de sujeción y guiado son los encargados de unir la mangueta o porta buje a la carrocería, permitiendo a la vez movimientos oscilatorios de la rueda. Además han de garantizar una eficaz sujeción del conjunto, permitiendo soportar los esfuerzos de sustentación, tracción y frenado a la que está sometida la rueda. Hay varios tipos:

#### ➤ Mangueta

La mangueta o portabuje es el elemento que soporta directamente a la rueda, a través del buje y los rodamientos que le permiten su rodadura. También sirve de unión entre la rueda y los elementos oscilantes y de guiado de la suspensión. Por otra parte,

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

permite la orientación directriz, en el caso de las ruedas delanteras, integrando en su estructura el brazo de acoplamiento.

En el tren trasero, no siempre se emplea mangueta, en cuyo caso sus funciones son efectuadas por el brazo o puente, en cuyos extremos se disponen los alojamientos del buje y elementos de frenado, dando lugar al denominado portabuje.

#### ➤ Brazos oscilantes

Los brazos oscilantes son unos elementos que disponen de dos puntos de sujeción unidos a la carrocería mediante una unión articulada, en torno al cual pivotan. En algunos modelos se intercala un soporte intermedio entre la carrocería y el brazo.

En el tren delantero, se disponen de forma transversal con el eje de pivote paralelo al eje de simetría del vehículo, sin embargo, necesitan de un elemento de sujeción como un tirante debido a su escasa resistencia a los esfuerzos de tracción y frenado longitudinales.

#### ➤ Tirantes

Los tirantes son elementos que trabajan a tracción y compresión y parcialmente a flexión. La unión a la carrocería y la maqueta, se efectúan ambos mediante silentblocks, sin articulación oscilante, de tal modo que es la deformación de los propios silentblocks, junto a una cierta flexión del tirante, la que absorbe los movimientos producidos por las oscilaciones de la rueda.

#### ➤ Columna telescópica

La columna telescópica es un elemento formado por una pareja de cilindros de diferente diámetro, en el que el más pequeño se desliza por el interior del más grande. En la mayoría de los casos es el propio amortiguador el que actúa como columna telescópica.

En otros casos, la columna sirve de guía al émbolo que acciona el resorte neumático, como en las suspensiones hidroneumáticas.

#### ➤ Puente

El puente es el elemento que se emplea tan sólo en los sistemas de suspensión de eje rígido y semi-independiente. Es una pieza única que alberga las manguetas de ambos lados, formando un conjunto solidario dispuesto en sentido transversal.

Para el guiado de este elemento, que oscila con las ruedas, se utilizan ballestas, o bien brazos y/o triángulos cuando se emplean muelles como elementos elásticos. Si el eje en el que se emplea es motriz, suele alojar al conjunto grupo diferencial, así como a los palieres, mediante los cuales se transmite el movimiento de las ruedas.

## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

### ➤ Rótulas y articulaciones

Las rótulas y articulaciones permiten el giro o pivotado de los elementos de sujeción y guiado empleando uniones basculantes en su unión a la carrocería. En algunos casos, también se utilizan en su unión con la mangueta.

Las uniones basculantes tan sólo permiten el movimiento de los componentes en un solo plano, lo cual es incompatible con los movimientos oscilatorios y directrices en planos perpendiculares.

### ➤ Casquillos y silentblocks

Los casquillos sirven para efectuar las uniones articuladas y están generalizados como silentblocks. Esta flexibilidad aumenta el confort del vehículo, al servir como filtro antes vibraciones y ruidos. Además, actúa como complemento a los neumáticos y elementos elásticos de la suspensión, absorbiendo irregularidades menores.

### 3.1.8.4. Tipos de suspensión

Los tipos de suspensión se pueden clasificar atendiendo a dos criterios:

#### 3.1.8.4.1 Según la geometría

Según la geometría, existen varios tipos de suspensión:

#### ➤ Independiente

Se define una suspensión independiente aquella en la que las ruedas de un mismo eje pueden oscilar de forma independiente, la una respecto de la otra. Se da por sentado que los ejes delantero y trasero son a su vez independientes entre sí. Los turismos disponen de suspensión delantera independiente y la suspensión trasera ha dejado de emplearse desde hace más de tres décadas. Existen varios tipos de suspensión independiente:

- Brazos superpuestos: destacan por sus cualidades de precisión de guiado de la rueda en sus oscilaciones. Sin embargo, su mayor sofisticación y coste lo alejan del empleo en vehículos de los segmentos medio e inferior. La variante de este sistema utiliza dos triángulos superpuestos en sentido transversal, de tal forma que la trayectoria descrita por la rueda en sus oscilaciones apenas altera los ángulos de salida y caída. Existen versiones en las que se emplea un brazo de dos puntos en sustitución de uno de los triángulos dispuesto tanto en el lado superior como en el inferior. El elemento elástico, generalmente un muelle helicoidal, así como el amortiguador puede ser accionado bien por el brazo superior, o bien por el brazo inferior. También se han empleado barras de torsión, dispuestas en sentido longitudinal, e incluso ballestas, ubicadas en este caso en sentido transversal. El amortiguador, al igual que el muelle, puede ser accionado, indistintamente por el brazo superior o inferior.

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

○ Mc Pherson: es el sistema más utilizado, sobre todo en el tren delantero. También se monta en el tren trasero, aunque con mucha menos asiduidad. Posee las ventajas de gran sencillez constructiva, y por tanto bajo coste, además de ofrecer un buen guiado de la rueda en sus oscilaciones. La mangueta está unida, por su parte superior a una columna telescópica. Dicha columna gira con la rueda en su orientación directriz. En su parte inferior, la mangueta se une a un brazo oscilante. La fijación de la columna por su parte superior a la carrocería se efectúa a través de la denominada torreta, en la que se dispone de un rodamiento axial, para permitir el giro de la columna. El muelle se dispone alrededor del amortiguador. La unión del amortiguador a la mangueta tiene tres variantes:

- Mediante una pareja de tornillos.
- A través de una abrazadera.
- Introduciendo en su interior mediante una prolongación ascendente de la mangueta.

○ Brazos tirados: es un sistema de suspensión empleado en el tren trasero, siempre que dicho eje no sea motriz, en el que los brazos de gran consistencia y robustez se disponen de forma longitudinal, pivotando en un eje transversal por delante del eje delantero paralelo al mismo. En estos sistemas no se suelen emplear mangueta, disponiéndose el alojamiento del buje en el extremo del propio brazo al igual que el soporte de los elementos de freno.

○ Triángulos oblicuos: no se emplea en la actualidad. Dispone de una pareja de triángulos, con una estructura parecida a la de los brazos tirados pero con su eje de articulación inclinado a unos 30° de la transversal.

○ Multibrazo: es el sistema que ofrece mejores resultados pero, a su vez, es el más sofisticado. Se considera un sistema como multibrazo cuando se dispone de brazos y tirantes que trabajan dos o más planos diferentes. El gran número de elementos oscilantes asegura una excelente sujeción y guiado de la rueda. También se favorece la adopción de convergencia en la rueda exterior o rueda de apoyo. Los sistemas multibrazo comenzaron a emplearse en el tren trasero de los vehículos de propulsión para soportar los esfuerzos a que se veía sometida la suspensión en vehículos de gran potencia. También se emplea en el tren delantero con una mangueta de gran altura cuya forma evita el rozamiento con el lateral interior de la rueda.

#### ➤ Semi Independiente

La suspensión semi-independiente, también llamada semi-rígida está formada por un puente o eje rígido que une ambas ruedas. La particularidad está en la ubicación

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

del puente que une entre sí ambos brazos tirados, próximo al eje de articulación de dichos brazos tirados, muy alejado de las ruedas, así como en su perfil, que presenta cualidades para su deformación.

Podría, por tanto, definirse como un sistema de brazos tirados, unidos entre sí mediante una traviesa flexible, que da cierta independencia entre los movimientos oscilatorios de ambas ruedas. Ofrece un buen comportamiento y gran sencillez constructiva, por lo que es muy empleado en vehículos del segmento medio e inferior, siempre en el tren trasero.

➤ No independiente

En los sistemas de suspensión no independiente ambas ruedas de un mismo eje oscilan simultáneamente al estar unidas entre sí mediante una traviesa rígida sin cualidades elásticas. Existen dos tipos de eje para la suspensión no independiente:

○ Eje rígido.

Las ventajas que tiene el eje rígido son las siguientes:

- Asegurar el contacto permanente de la rueda con el suelo.
- Ofrecer un perfecto guiado y sujeción de los palieres permitiendo prescindir en los mismos de articulaciones. Son más ligeros, sencillos y económicos.
- Ofrecer una gran robustez y resistencia.

Sin embargo, tiene varios inconvenientes que se describen a continuación:

- Las masas no suspendidas de gran valor condiciona el funcionamiento de la suspensión.
- Menor confort al repercutir sobre ambas ruedas las irregularidades sufridas por cada una de ellas.
- Menor estabilidad por la peor eficacia de la suspensión.
- Menor habitabilidad por el hueco que hay que prever para las oscilaciones del puente.

○ Eje de Dion.

El eje de Dion es una variante del eje rígido en la que se independiza la transmisión de la suspensión. Para ello, sin dejar de ser rígido, el conjunto grupo diferencial va fijado a la carrocería. Por ello, los palieres se han de unir a las ruedas mediante juntas articuladas, lo cual le resta simplicidad al

## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

conjunto. A cambio, la respuesta del sistema de suspensión mejora puesto que disminuye el valor de las masas no suspendidas, al no tener que oscilar los elementos de la transmisión.

### 3.1.8.4.2. Según el sistema de control

Según el sistema de control de una suspensión, se distinguen varios tipos:

➤ Pasiva

El sistema de suspensión pasiva debe compensar los movimientos no deseados del vehículo producidos por la calzada y las maniobras de conducción, además de garantizar el contacto de las ruedas sobre el suelo para transmitir eficazmente las fuerzas. Consta de un sistema compuesto por un muelle más un amortiguador funcionando en paralelo. Sin embargo, este tipo de suspensión tiene el inconveniente de la difícil gestión sobre su comportamiento. Desde el punto de vista del confort, la solución idónea sería recurrir a una suspensión blanda, sin embargo, de esta forma se estará comprometiendo la seguridad del vehículo, ya que aparecen dos efectos adversos: el aumento de balanceo de la carrocería en curva y un mayor cabeceo del vehículo en fases de frenado fuerte. La solución pasaría entonces por modificar la dureza del sistema. Aumentando su rigidez, se disminuyen los efectos de balanceo y de cabeceo, sin embargo, se reduce de igual forma el confort de los pasajeros.

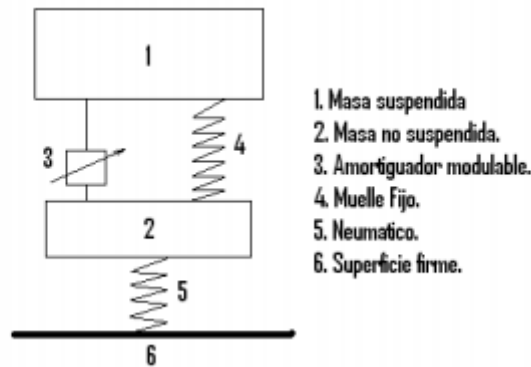
➤ Semiactiva

Su disposición es muy similar a la de una suspensión del tipo pasivo, sin embargo, se sustituyen los amortiguadores convencionales por amortiguadores modulables y además se añaden una serie de componentes electrónicos encargados de dar la información necesaria a la centralita del sistema para que esta elija la configuración óptima de suspensión.

El uso de un sistema de regulación permite variar los mecanismos de suspensión y amortiguación para adaptarse a las necesidades de uso del conductor. Estos sistemas emplean componentes electrónicos regulables como sensores, módulos de control, etc. (Véase Figura 3.43).

Estos sistemas no precisan de energía externa, sino que únicamente se actúa en la forma de funcionamiento de los amortiguadores, normalmente limitando el paso de aceite o de gas por las diferentes cámaras de las que se componen.

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL



**Figura 3.42.** Esquema de suspensión semiactiva

Como conclusión, se resume que, a diferencia de la suspensión pasiva, la suspensión activa y semi-activa posee un controlador y la diferencia entre estas dos es que en la suspensión semi-activa ejerce una fuerza y no energía como en el caso de la activa.

#### ➤ Activa

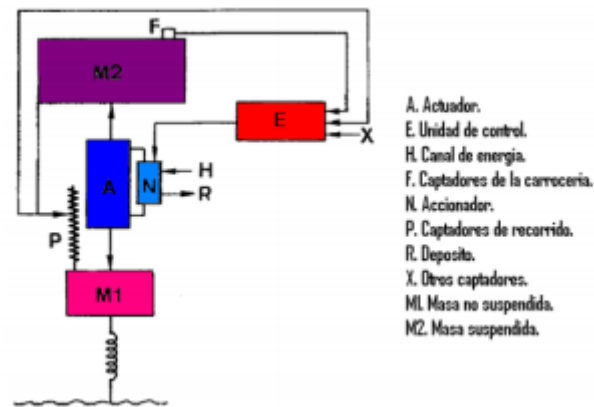
Las suspensiones activas y semiactivas consisten en un sistema de lazo cerrado con retroalimentación. En las activas, al contrario que en las semiactivas, no hay muelle ni amortiguador. Un actuador hidráulico genera fuerzas para compensar el balanceo y cabeceo del vehículo, mientras que un computador electrónico se encarga de monitorizar constantemente (gracias a los diversos sensores), el perfil de la carretera y envía señales eléctricas a las suspensiones delantera y trasera.

Para mejorar el mecanismo de suspensión con respecto a la superficie de contacto, a la velocidad, a la manera de conducir y a otros factores, sólo se puede lograr mediante una regulación que actúa sobre cada rueda y sea rápida y constante [16].

Los sistemas de suspensión activas se caracterizan por el hecho de que todas o parte de las fuerzas de suspensión son generadas por actuadores que necesitan de un canal de energía externa (véase figura 3.42) [17].



### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL



**Figura 3.43.** Esquema de una suspensión activa

Los sistemas de suspensión activa se presentan como respuesta a la necesidad de desarrollar automóviles seguros y capaces de combinar elevados niveles de confort, control y maniobrabilidad y acaba con el conflicto entre confort y estabilidad, manteniendo un contacto suficiente entre neumáticos y eliminando tanto el balanceo en curva como el cabeceo en la frenada.

El sistema se compone de actuadores hidráulicos que reemplazan en algunos casos al conjunto muelle-amortiguador de cada rueda, junto con bombas, sensores, servo válvulas y la unidad de control electrónico. Esta unidad monitorea el perfil de la carretera constantemente y envía señales eléctricas que controlan las suspensiones delantera y trasera. Así, con el sistema de suspensión activa se consigue que el comportamiento de la suspensión sea el apropiado en cada situación.

Cuando un automóvil con suspensión activa toma una curva, el sistema limita la inclinación de la carrocería, permitiendo un mejor control del automóvil al evitar el movimiento de su centro de gravedad. Además, este sistema permite mejorar la adherencia de cada rueda al terreno aumentando la maniobrabilidad del automóvil y su nivel de seguridad activa.

En el control activo existen varios tipos de algoritmos de control [18]:

- Mínimos cuadrados

El método de mínimos cuadrados identifica en tiempo real los modelos lineales o no lineales siempre que sus parámetros sean lineales [19]. El modelo paramétrico lineal de una variable es el siguiente:

$$y(k) + a_1y(k-1) + \dots + a_ny(k-n) = b_1u(k-1) + \dots + b_nu(k-n)$$

(Ec. 3.1)

Lo que es equivalente a escribir:

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

$$u(k) = m(k)\theta \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Dónde:

$$m(k) = \begin{bmatrix} -y(k-1) & \cdots & -y(k-n) & u(k-1) & \cdots & u(k-n) \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

El vector  $M(k)$  (véase ecuación 3) es el llamado regresor y  $\theta$  es el llamado vector de parámetros:

$$\theta = \begin{bmatrix} a_1 & \cdots & a_n & b_1 & \cdots & b_n \end{bmatrix}^T \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Dado un valor del vector de parámetros, el error de predicción par al instante  $k$  es el siguiente:

$$e(k, \hat{\theta}) = y(k) - \hat{y}(k) = y(k) - m(k)\hat{\theta} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

El método de mínimos cuadrados parte de  $N$  pares  $(y(k), m(k))$  donde  $N$  es mucho mayor de  $2n$  (donde  $n$  sería el conjunto de estimación). Las medidas obtenidas desde  $K=n$  hasta  $k=N$  se agrupan en vectores, de manera que se obtiene:

$$E(N, \theta) = Y(N) - M(N)\theta \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde  $E(N, \theta)$  y  $Y(N)$  son:

$$E(N, \theta) = \begin{bmatrix} e(n, \theta) & \cdots & e(N, \theta) \end{bmatrix}^T \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$Y(N) = \begin{bmatrix} y(n) & \cdots & y(N) \end{bmatrix}^T \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Y la matriz  $M(N, \theta)$  está formada por los regresores correspondientes:

$$M(N) = \begin{bmatrix} m(n) \\ \vdots \\ m(N) \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Se buscará la pseudosolución  $(\theta^*)$  del sistema óptimo en el sentido de los mínimos cuadrados, es decir, minimizando:

$$J(\theta) = \|E(N, \theta)\|^2 = \sum_{k=n}^N e^2(k, \theta) \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Donde el índice  $J$  se puede escribir como:

$$J(\theta) = (Y(N) - M(N)\theta)^T (Y(N) - M(N)\theta) \quad (\text{Ec. 3.11})$$

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

Por lo tanto el valor mínimo es el valor de  $\theta$  que hace que la derivada de  $J(\theta)$  se haga cero:

$$\theta^* = [M^T(N)M(N)]^{-1}M^T(N)Y(N) \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Este método es el llamado fuera de línea, el cual necesita de muchas medidas para minimizar el efecto de ruidos y perturbaciones y no es apropiado para sistemas cuya dinámica varía a lo largo del experimento.

- PID

Los reguladores PID son los más aplicables a la industria.

Estos sistemas se desarrollaron para poder ajustar automáticamente controladores PID sin necesidad de intervención del operario. Sin embargo para el ajuste del PID se necesitaba una cierta información básica, por lo que a la vez se desarrolló el modo pre-tune que servía para dar la información esencial de la disposición de la planta.

La función más demandada era la función de autoajuste inicial la cual se activa al instalarse el controlador respondiendo el controlador con la realización de una batería de test pre-programados que ajustan automáticamente el controlador.

Para conseguir el autoajuste se puede utilizar cualquier técnica de control adaptativo siempre que sus ensayos requeridos sean sencillos para que puedan hacerse de manera automática.

Los controladores de autoajuste tienen dos modos de funcionamiento, el modo normal en el que funcionan como cualquier controlador y el modo de ajuste, en el cual se desconecta el control, se realizan los ensayos y se vuelve al modo normal con el controlador ajustado.

El controlador con autoajuste simplifica mucho las tareas de instalación y puesta en marcha de los controladores, además no incrementan mucho el coste final y son una manera de introducir técnicas de control adaptativo en la industria.

- Regulador autoajustable (STR)

El regulador autoajustable (“Self Tuning Regulator”) es un tipo de control adaptativo en el que según el conocimiento del proceso a controlar son capaces de ajustarse a sí mismos. El conocimiento se va ajustando en tiempo real y se mantiene lo más cercano al óptimo.

Los STR basan su funcionamiento en el principio de equivalencia cierta que consiste en suponer que los parámetros del proceso coinciden con los que

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

se obtienen por identificación. Como el controlador se recalcula en cada paso y los parámetros se actualizan, a su vez en cada paso, el principio de equivalencia cierta no es una suposición muy arriesgada.

En un STR hay tres partes muy diferenciadas:

- Algoritmo recursivo de identificación: sirve para la actualización de los parámetros en tiempo real.
- Mecanismo de adaptación: desarrolla la tarea de diseño del regulador.
- Regulador con parámetros ajustables: normalmente tiene una estructura fija y puede ser cualquier tipo de controlador lineal en el que se pueden ajustar los parámetros.

Para concluir, se debe diferenciar un controlador autoajutable del tipo STR y un controlador con autoajuste. En los primeros el controlador de forma autónoma va adaptándose de manera más o menos continuada. Sin embargo en los segundos, el autoajuste sólo se realiza si el operador lo demanda, y se usa cuando se instala o se cambian las condiciones del equipo a controlar.

## 3.2. Dinámica vehicular

### 3.2.1. Fuerzas que actúan sobre el vehículo

Las fuerzas que actúan sobre un vehículo son las siguientes:

- Resistencia al rozamiento

La resistencia a la rodadura representa lo que le cuesta a una rueda rodar sobre el suelo [20]. Depende de la naturaleza del suelo, la presión de inflado del neumático y el estado del mismo, la velocidad del vehículo, etc.

Tiene la expresión:

$$R_r = \mu_r * Q \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Dónde  $\mu_r$  es el coeficiente de rodadura y  $Q$  es el peso total del vehículo.

Los valores usuales del coeficiente de rozamiento se indican en Tabla 3.1.

Velocidad de diseño $V_d$ (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Coeficiente de fricción longitudinal ( $\mu$ )	0.440	0.400	0.370	0.350	0.330	0.320	0.315	0.310	0.305	0.300

**Tabla 3.1.** Valores usuales del coeficiente de rozamiento

- Resistencia aerodinámica

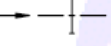

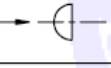
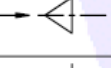

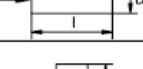


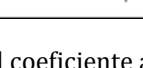
La resistencia aerodinámica es la resistencia que ofrece el vehículo al desplazarse debido al aire existente a su alrededor.

Tiene la expresión:

$$R_a = \frac{1}{2} \rho \times S \times C_x \times V^3 \quad (\text{Ec. 3.14})$$

Donde  $C_x$  es un coeficiente aerodinámico que depende de la forma del vehículo y sus valores se pueden observar en la tabla 3.2 ( $S$  es la sección transversal del vehículo y  $V$  es la velocidad del vehículo).

### CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

Cuerpo	Orientacion del flujo	Cx
Placa circular		1.17
Esfera		0.47 *
Semiesfera		0.42 *
Cono (60°)		0.5
Cubo		1.05 *
Cilindro ( $l/D > 2$ )		0.82
Cilindro ( $l/D < 1$ )		1.15
Cuerpo currentilíneo $l/D = 2.5$		0.04
Medio cuerpo currentilíneo sobre el suelo		0.09

**Tabla 3.2.** Valores del coeficiente aerodinámico

La resistencia aerodinámica total es la suma de una resistencia de rozamiento que resulta de la velocidad del fluido y la adherencia del mismo y otra causada por el aumento de presión del fluido (debida a un obstáculo que produce torbellinos en la parte trasera del vehículo).

#### ➤ Resistencia gravitatoria

Cuando un vehículo se desplaza por una rampa, su peso se descompone en dos fuerzas, una paralela a la pendiente, y otra, perpendicular a la misma. En los casos de ascensión esta resistencia en dirección paralela a la rampa se opone al movimiento mientras que en descensos favorece el movimiento.

Tiene la expresión  $R_p = Q \times \sin\theta$  (Ec. 3.15)

Dónde  $\theta$  es el ángulo de inclinación de la rampa y  $Q$  el peso total del vehículo.

#### ➤ Resistencia por rozamientos mecánicos

La resistencia por rozamientos mecánicos es debida al esfuerzo de rotación que transmite el motor a las ruedas.

## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

---

### 3.2.2. Tipos de movimiento

El vehículo automóvil realiza tres tipos de movimientos:

➤ Cabeceo

El movimiento de cabeceo de un vehículo se manifiesta de forma transitoria cuando este se encuentra un obstáculo y de forma más persistente en fases de aceleración y frenado [21].

Los parámetros que influyen en este fenómeno son la geometría de las suspensiones, la rigidez de los muelles de estas, la relación entre la altura del baricentro sobre el suelo, la batalla y la distribución de los esfuerzos (véase Figura 3.45).

Es preciso que las oscilaciones sean valores con amplitudes pequeñas y se amortiguan rápidamente con el tiempo.

➤ Balanceo

El centro de balanceo de un vehículo es un punto situado en el plano transversal de la suspensión delantera o trasera, en torno al cual gira la masa suspendida del vehículo bajo la acción de la fuerza centrífuga [22].

Los dos centros de balanceo, delantero y trasero definen una recta, el eje de balanceo, en torno al cual gira el vehículo en sus oscilaciones laterales. La posición de este eje es muy importante ya que la distancia del centro de gravedad a este eje impone la tendencia del coche a balancearse y a elevarse en las curvas (véase Figura 3.45).

➤ Guiñada

El efecto de guiñada de un vehículo es cualquier movimiento de rotación alrededor de su eje vertical. El eje de guiñada es vertical y pasa por el baricentro.

Las causas que pueden provocar guiñada son: un valor distinto de las fuerzas centrífugas que actúan sobre las ruedas delanteras y sobre las traseras o bien una diferente adherencia de las ruedas (Véase Figura 3.44).

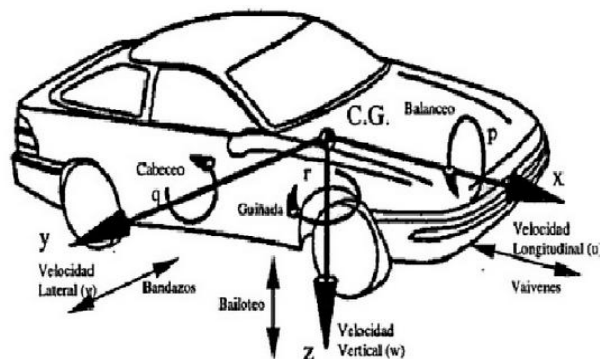


Figura 3.44. Cabeceo, balanceo y guiñada de un vehículo

### 3.2.3 Dinámica vertical

#### **3.2.3.1 Sensibilidad humana a las vibraciones verticales**

La vibración se define como el movimiento oscilante que hace una partícula alrededor de un punto fijo. Este movimiento puede ser regular en dirección, frecuencia e intensidad, o aleatoria que es lo más común [23].

La importancia de una vibración, desde el punto de vista ergonómico, está dada por dos magnitudes, la intensidad y la frecuencia. Cualquier estructura física puede ampliar la intensidad de una vibración si esta se da en ciertas frecuencias características de la estructura receptora.

Las diferentes partes del cuerpo poseen unas determinadas frecuencias de resonancia y las vibraciones que reciban a esas frecuencias pueden ver amplificadas sus intensidades dando lugar a efectos nocivos para el ser humano.

Las vibraciones afectan a zonas extensas del cuerpo, originando mareos, cefaleas, trastornos gástricos, etc...Por eso, es importante evitarlas.

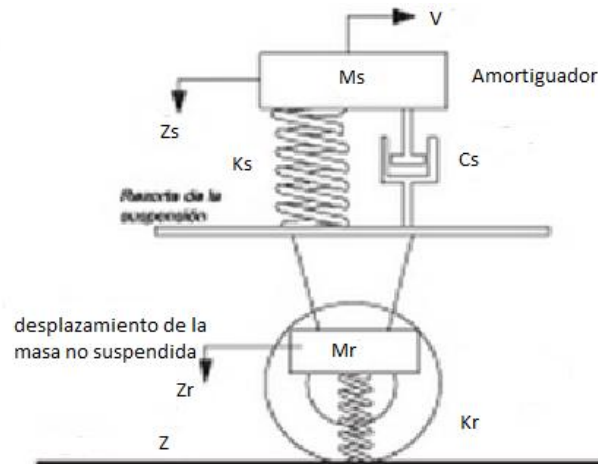
#### **3.2.3.2 Modelos dinámicos de suspensión**

Es imprescindible evaluar el grado de influencia que tienen los principales elementos de la suspensión de un coche, representados por medio de los neumáticos y los amortiguadores, en la lectura del grado de adherencia lo que determina el mínimo valor de la fuerza normal de contacto rueda - suelo en un vehículo [24].



## CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

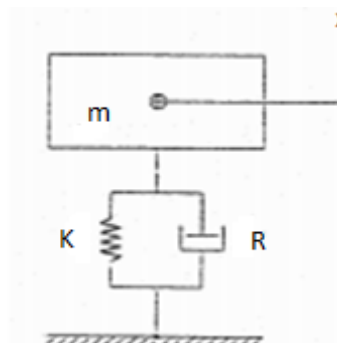
### 3.2.3.3 Modelo de dos grados de libertad: un cuarto de vehículo



**Figura 3.45.** Modelo un cuarto de vehículo

El modelo un cuarto de vehículo es un modelo de dos grados de libertad que permite estudiar la excitación de la suspensión en unas condiciones de frecuencia y amplitud de desplazamiento variables, produciendo un movimiento oscilante en el cuerpo del coche (véase figura 3.45).

Para la modelización del vehículo se consideró inicialmente que la masa  $m_2$  no se mueve debida a su significativa inercia. Por tanto el sistema equivalente viene dado por la modelización clásica de un grado de libertad (véase Figura 3.46).



**Figura 3.46.** Modelo un grado de libertad

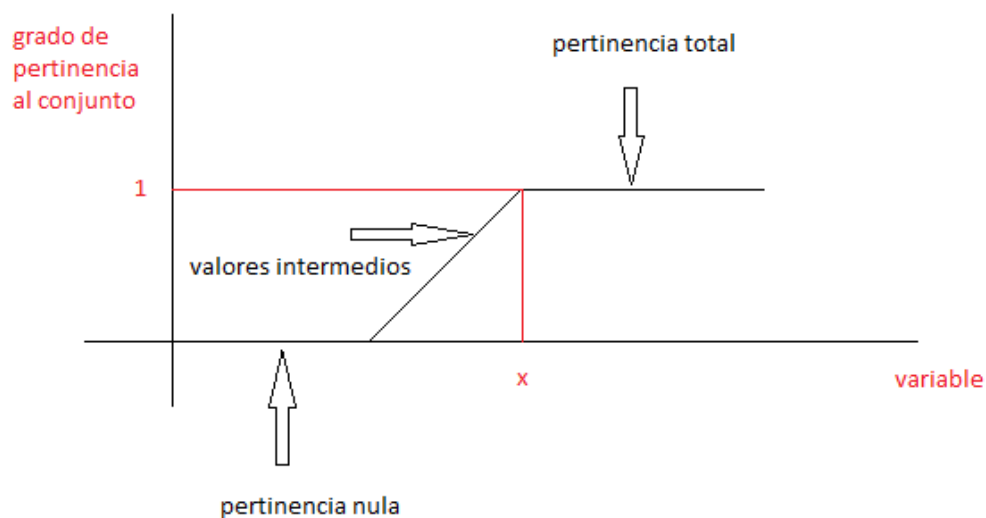
# CAPÍTULO 4: LÓGICA FUZZY

---

## 4.1 Control y lógica difusa

### 4.1.1. Fundamentos

La lógica fuzzy o lógica borrosa está formada por conjuntos borrosos que son conjuntos en los cuales la pertinencia de sus elementos se define mediante una función que se denomina función de pertenencia (véase Figura 4.1) [25].



**Figura 4.1.** Función de pertenencia

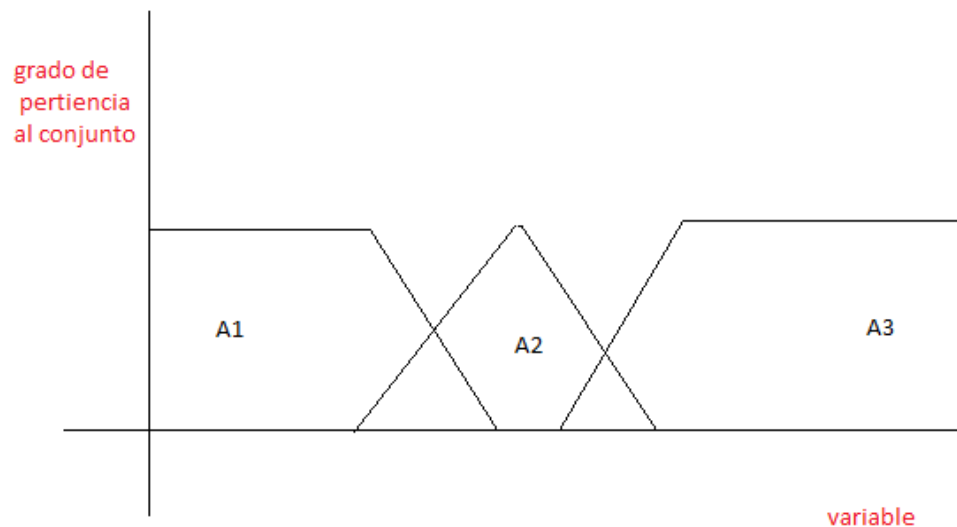
La función de pertenencia marca si un valor pertenece totalmente a un conjunto, no pertenece o bien pertenecen más o menos a ese conjunto. Los valores intermedios marcan las diferencias con los conjuntos clásicos que devuelven valores uno o cero.

La función de pertenencia puede tener varias formas: trapezoidal, triangular, campana sinusoidal o irregular.

El control difuso está formado por 3 bloques:

- Fuzzificación

La fuzzificación se encarga de tratar la información de entrada en conceptos fuzzy, en concreto transforma una medida del entorno a una representación en forma de posibilidad (véase Figura 4.2).



**Figura 4.2.** Fuzzificación

➤ Motor de Inferencia

El motor de Inferencia está formado por un conjunto de reglas lingüísticas de control de la forma:

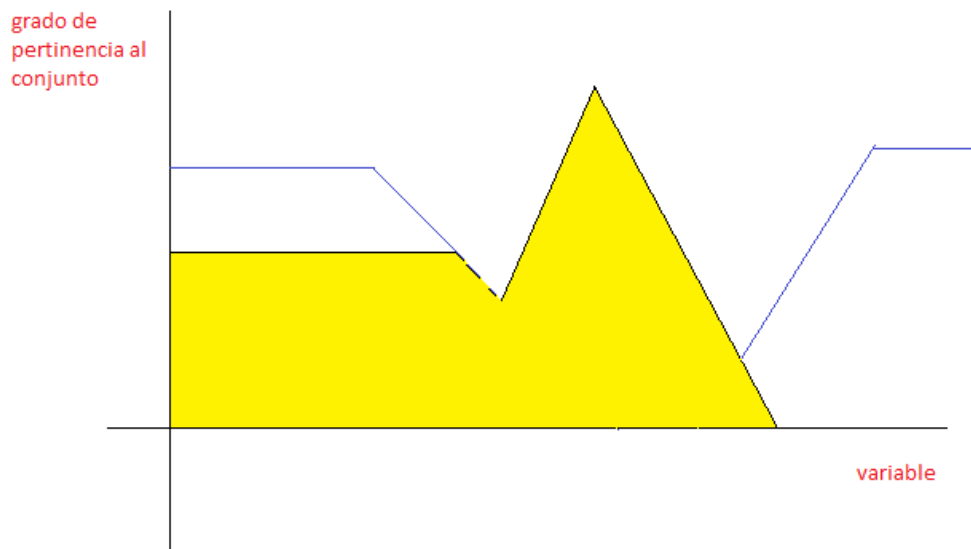
$$1. (X \text{ es } A1, y \text{ es } B1 \rightarrow Z \text{ es } C1) \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$2. (X \text{ es } A2, y \text{ es } B2 \rightarrow Z \text{ es } C2) \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Dónde las variables X e Y son las variables de entrada; A1 y A2 conjuntos borrosos de X; B1 y B2 conjuntos borrosos de Y; Z es una variable de salida y C1 y C2 conjuntos borrosos de Z.

➤ Defuzzificación

La defuzzificación (véase Figura 4.3) es el proceso inverso a la fuzzificación. Se encarga de transformar el conjunto fuzzy final en un valor numérico usando el método del centro de gravedad, o bien transformar un valor cualitativo usando el método de la distancia o el método sumatorio cuenta.



**Figura 4.3.** Defuzzificación

#### 4.1.2. Antecedentes del control difuso

Las bases de la lógica fuzzy surgieron en 1965 por Lotfi Zadeh, profesor de la universidad de California en Berkeley que dio cuenta de lo que él mismo denominó principio de incompatibilidad: “Conforme la complejidad de un sistema aumenta, nuestra capacidad para ser precisos y construir instrucciones sobre su comportamiento disminuye hasta el umbral más allá del cual, la precisión y el significado son las características excluyentes” [26].

Introdujo la idea de que los elementos sobre los que se construye el pensamiento humano no son números sino etiquetas lingüísticas. La lógica difusa permite representar el conocimiento que es mayoritariamente de tipo cualitativo y no cuantitativo, en un lenguaje matemático que en muchas ocasiones aportan información útil para el razonamiento humano.

Las características más atractivas de la lógica difusa son su flexibilidad, su tolerancia con la imprecisión, su capacidad para modelar sistemas no lineales y su base en el lenguaje natural.

Aunque la lógica difusa se atribuye a Zadeh, hace 2500 años atrás, los filósofos griegos consideraban que existían varios grados de falsedad y veracidad.

Aunque en un principio la lógica difusa encontró una fuerte resistencia entre la comunidad científica, algunos investigadores se convirtieron en seguidores de Zadeh explorando nuevas teorías de conjuntos difusos. Lakoff, Goguen, Kohout, Smith, Sugeno, Chang Zimmermann, entre, otros hicieron aportaciones en el desarrollo de esta teoría.

A principio de la década de los setenta se establecen grupos de investigación en algunas universidades japonesas que contribuye al estudio de las aplicaciones con lógica borrosa.

## CAPÍTULO 4: LÓGICA FUZZY

---

En 1974, el británico Ebrahim Mamdani, demuestra la aplicabilidad de la lógica difusa en el campo de control y desarrolla el primer sistema de control difuso práctico: la regulación de un motor de vapor.

Paralelamente, surgen las primeras aproximaciones para construir reglas fuzzy a partir de datos de entrenamiento que se convierten en el punto de partida para investigar más adelante en la identificación de los modelos fuzzy.

En la década de los noventa aparecen los algoritmos genéticos y las técnicas computacionales que aportan el control fuzzy y proporcionan herramientas muy potentes en el campo de los sistemas de control.

En 1987 la lógica fuzzy alcanzó su máximo esplendor en Japón al iniciarse una colaboración entre el gobierno, las universidades y las industrias japonesas estableciéndose proyectos nacionales. Desde entonces el control fuzzy ha sido aplicado con éxito en muy diversas ramas. Sin embargo, los investigadores buscan nuevos campos de aplicación de esta técnica.

### 4.1.3. Conjuntos difusos y funciones características

Los conjuntos difusos pueden ser considerados como una generalización de los conjuntos clásicos; la teoría clásica de conjuntos sólo contempla la pertinencia o no de un elemento a un conjunto, sin embargo, la teoría de conjuntos difusos contempla la pertinencia parcial de un elemento a un conjunto, es decir cada elemento presenta un grado de pertenencia a un conjunto difuso que puede tomar cualquier valor entre 0 y 1.

Este grado de pertinencia se define mediante una función característica asociada al conjunto difuso en el que para cada variable de entrada la función característica  $\mu_A(x)$  proporciona el grado de pertinencia de ese valor de  $x$  al conjunto difuso.

Formalmente un conjunto  $A$  en un universo  $U$  puede definirse de dos maneras:

- Enumerando los elementos que pertenecen al conjunto especificando las propiedades que deben cumplir los elementos que pertenecen a ese conjunto
- En términos de  $\mu_A(x)$ :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (\text{Ec.4.3})$$

Se puede decir que  $A$  es equivalente matemáticamente a su función de pertenencia ya que conocer  $\mu_A(x)$  es lo mismo que conocer  $A$ .

Un conjunto difuso en  $U$  se caracteriza por la función de pertinencia  $\mu_A(x)$  que toma valores entre 0 y 1 puede representarse:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in U\} \quad (\text{Ec.4.4})$$

Los conceptos de la teoría clásica de conjuntos más utilizados son:

➤ El soporte de un conjunto difuso  $A$  en el universo  $U$  es un conjunto (“crisp”) numérico que contiene todos los elementos de  $U$  que tienen un valor de pertenencia distinto de cero en  $A$ , o lo que es lo mismo:

$$\text{sop}(x) = \{x \in U | \mu_A(x) > 0\} \quad (\text{Ec.4.5})$$

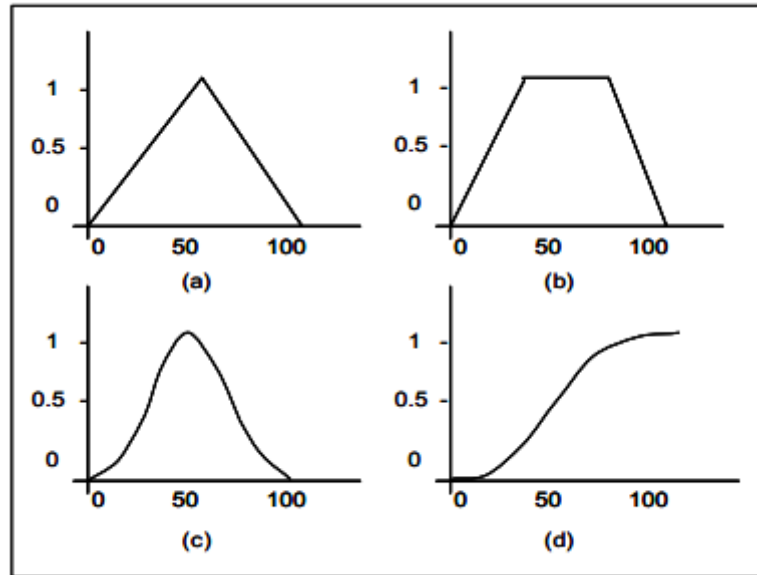
Si el soporte de un conjunto difuso no contiene ningún elemento tendremos un conjunto difuso vacío. Si el conjunto difuso es sólo un punto habrá lo que se conoce como “singleton” difuso.

➤ El punto de cruce de un conjunto difuso es el punto de  $U$  cuyo valor de pertenencia al conjunto es igual a 0.5.

➤ Dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  son iguales si y sólo si sus funciones características son iguales.

➤ El conjunto difuso  $B$  contiene al conjunto difuso  $A$  ( $A \subset B$ ) si  $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$  para todo  $x \in U$ .

La función característica da una medida del grado de similaridad de un elemento de  $U$  con el conjunto difuso. La forma de la función característica varía según la resolución del problema y del usuario, la única condición que debe cumplirse es que tome valores entre 0 y 1 con continuidad. Las más utilizadas son triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal, gamma, pi, campana, etc. Existen dos aproximaciones para determinar la función característica, una está basada en el conocimiento humano y la segunda en utilizar una colección de datos para el diseño de la función (véase Figura 4.4).



**Figura 4.4.** Ejemplos de funciones características

Cuanto mayor sea el número de funciones utilizadas mayor resolución se obtiene pero mayor es la complejidad computacional.

Las funciones pueden estar solapadas o no. Si se solapan indica que una variable puede pertenecer con diferentes grados a varios conjuntos difusos a la vez.

#### 4.1.3.1. Operaciones con conjuntos difusos

Las operaciones entre conjuntos difusos son:

➤ El conjunto complementario  $\bar{A}$  de un conjunto difuso de  $A$  es aquel cuya función característica viene dado por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{Ec. 4.6})$$

➤ La unión de dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  es un conjunto difuso  $A \cup B$  en  $U$  cuya función característica viene dado por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{Ec. 4.7})$$

➤ La intersección de dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  es un conjunto difuso  $A \cap B$  en  $U$  con función característica:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{Ec. 4.8})$$



## CAPÍTULO 4: LÓGICA FUZZY

Estas tres operaciones cumplen las reglas de asociatividad, conmutatividad y distribuida así como las leyes de Morgan.

Existen, a su vez dos leyes fundamentales de la teoría clásica que no se cumplen en la teoría de conjuntos difusos y son:

- Principio de contradicción:

$$A \cup \bar{A} = U \quad (\text{Ec. 4.9})$$

- Principio de exclusión:

$$A \cap \bar{A} = 0 \quad (\text{Ec. 4.10})$$

En consecuencia algunas teorías derivadas de la lógica de conjuntos como las de probabilidad serán muy distintas a la planteada en término difusos.

Las funciones que definen la unión y la intersección de conjuntos difusos pueden generalizarse a condición de cumplir ciertas restricciones. Las funciones que cumplen estas condiciones son la Conorma triangular (t-conorma) y la Norma Triangular (t-norma).

Los principales operadores que cumplen la condición para ser Conorma Triangular son el operador máximo y la suma algebraica:

$$[\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x)] \quad (\text{Ec. 4.11})$$

Los principales operadores que cumplen las condiciones para ser Norma Triangular son el operador mínimo y el producto algebraico:

$$[\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x)\mu_B(x)] \quad (\text{Ec. 4.12})$$

### 4.1.3.2. Relaciones difusas

Una relación difusa representa el grado de presencia o ausencia de una asociación, integración o interconexión entre elementos de dos o más conjuntos difusos. Por ejemplo supuestos dos universos  $U$  y  $V$ , la relación  $R(U,V)$  indica un conjunto difuso en el espacio  $U \times V$  que se caracteriza por la función de pertenencia  $\mu_R(x,y)$  donde “ $x$ ” pertenece a  $U$  y “ $y$ ” pertenece a  $V$ , es decir:

$$R(U,V) = \{((x,y), \mu_R(x,y)) | (x,y) \in U \times V\} \quad (\text{Ec. 4.13})$$

Dónde  $\mu_R(x,y) \in [0,1]$  en las relaciones difusas y  $\mu_R(x,y) = 0$  ó  $1$  en las relaciones clásicas.

Las operaciones ya definidas pueden aplicarse a las relaciones. Supuesto  $R(x,y)$  y  $S(x,y)$ , dos relaciones en el mismo espacio producto  $U \times V$  se define la intersección y la unión como:

$$\mu_{R \cap S}(x, y) = \mu_R(x, y) * \mu_S(x, y) \quad (\text{Ec. 4.14})$$

$$\mu_{R \cup S}(x, y) = \mu_R(x, y) \oplus \mu_S(x, y) \quad (\text{Ec. 4.15})$$

Dónde \* es cualquier t-norma y  $\oplus$  es cualquier t-conorma

En el caso de que las relaciones difusas R y S pertenezcan a distintos espacios producto  $R(U, V)$  y  $S(V, W)$  su composición difusa se hace igual que en la composición clásica teniendo en cuenta que la relación R tiene asociada una función  $\mu_R(x, y)$  y S tiene asociada una función  $\mu_S(y, z)$  tomando ambos valores en  $[0, 1]$ . Entonces la composición difusa  $R \circ S$  se define como una relación difusa en  $U \times W$  cuya función de pertinencia viene dada por:

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \sup_{y \in V} [\mu_R(x, y) * \mu_S(y, z)] \quad (\text{Ec. 4.16})$$

Dónde “sup” es el máximo y \* puede ser cualquier t-norma. En función de la t-norma hay dos composiciones:

➤ La composición máx-min de las relaciones difusas  $R(U, V)$  y  $S(V, W)$  es una relación difusa  $R \circ S$  en  $U \times W$  cuya función de pertinencia viene dada por:

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \max_{y \in V} \min [\mu_R(x, y), \mu_S(y, z)] \quad (\text{Ec. 4.17})$$

Dónde  $(x, z) \in U \times W$

➤ La composición max-product de las relaciones difusas  $R(U, V)$  y  $S(V, W)$  es una relación difusa  $R \circ S$  en  $U \times W$  cuya función de pertinencia viene dada por:

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \max_{y \in V} [\mu_R(x, y) \cdot \mu_S(y, z)] \quad (\text{Ec. 4.18})$$

Dónde  $(x, z) \in U \times W$

#### 4.1.4. Inferencia difusa

Se denominan reglas difusas al conjunto de proposiciones IF-THEN que definen el problema a resolver. Las reglas difusas tienen la estructura:

“Si u es A entonces v es B” donde A y B son conjuntos difusos definidos en los rangos u y v respectivamente. Una implicación lógica representa un tipo de relación entre los conjuntos A y B cuya función característica sería:  $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$ . La elección de la función característica está sujeta a las reglas de la lógica proposicional.

#### 4.1.4.1. Fundamentos de la lógica proposicional

En la teoría de la lógica clásica una proposición sólo puede ser verdadera o falsa, no admite términos intermedios y las proposiciones pueden combinarse usando tres operaciones elementales:

- Conjunción ( $p \wedge q$ ): las dos proposiciones son simultáneamente verdaderas.
- Disyunción ( $p \vee q$ ): cualquiera de las dos proposiciones es cierta
- Implicación ( $p \rightarrow q$ ): el cumplimiento de una proposición tiene como consecuencia el cumplimiento de la otra.
- Negación ( $\sim p$ ): invierte el sentido de la proposición.

Estas operaciones se pueden ver en la tabla 4.1.

P	Q	$p \wedge q$	$p \vee q$	$p \rightarrow q$	$\sim p$
V	V	V	V	V	F
V	F	F	V	F	F
F	V	F	V	V	V
F	F	F	F	V	V

**Tabla 4.1.** Operaciones entre las proposiciones

Las equivalencias entre la lógica proposicional y la teoría de conjuntos se muestran en la tabla 4.2.

Lógica proposicional	Teoría de conjuntos
$\wedge$	$\cap$
$\vee$	$\cup$
$\sim$	$-$

**Tabla 4.2.** Equivalencias de los operadores

La correspondencia de los operadores algebraicos utilizados en la lógica proposicional y la teoría de conjuntos se muestran en la tabla 4.3.

Lógica proposicional	Álgebra de Boole
V	1
F	0
$\wedge$	$\times$
$\vee$	$+$
$\sim$	$'$
$\leftrightarrow$	$=$
P,q,r	a,b,c

**Tabla 4.3.** Operadores algebraicos utilizados en la lógica proposicional y la teoría de conjunto

En la teoría clásica proposicional existen dos importantes reglas de inferencia, el Modus Tollens y el Modus Ponens:

➤ Modus Tollens o razonamiento inverso. Es el menos utilizado. Sigue la forma:

Premisa 1: "y es NO B"  
Premisa 2: "Si x es A ENTONCES y es B"  
Consecuencia "x es NO A"

➤ Modus Ponens o razonamiento directo:

Premisa 1: "x es A"  
Premisa 2: "SI x es A, ENTONCES y es B"  
Consecuencia "y es B"

#### 4.1.4.2. Implicación difusa

Como ya se ha descrito la proposición: "Si u es A, entonces v es B" (donde  $u \in U$  y  $v \in V$ ) tiene asociada una función característica que toma valores entre  $[0, 1]$ . Algunos ejemplos de funciones características pueden ser los siguientes:

$$\begin{aligned}\mu_{A \rightarrow B}(x, y) &= 1 - \mu_{A \cap B}(x, y) = 1 - \min [\mu A(x), 1 - \mu B(y)] \\ \mu_{A \rightarrow B}(x, y) &= \max [1 - \mu A(x), \mu B(y)] \\ \mu_{A \rightarrow B}(x, y) &= 1 - \mu A(x)(1 - \mu B(y))\end{aligned}\quad (\text{Ec. 4.19})$$

En lógica difusa el Modus Ponens se extiende a lo que se llama Modus Ponens Generalizado y que se resumen en:

Premisa 1: " $u$  es  $A^*$ "

Premisa 2: "Si  $u$  es  $A$  ENTONCES  $v$  es  $B$ "

Consecuencia: " $v$  es  $B^*$ "

Dónde  $A^*$  puede ser distinto de  $A$  y  $B^*$  distinto de  $B$ .

En lógica clásica una regla se ejecuta sólo si la primera premisa es la misma que el antecedente de la regla y el resultado de cada regla es exacto al consecuente. Sin embargo, en lógica difusa, una regla se ejecuta si existe un grado de similaridad distinto de cero entre la premisa y el antecedente de la regla y el resultado de la ejecución de la regla es un consecuente que tiene un grado de similaridad distinto de cero con el consecuente de la regla.

Así el Modus Ponens generalizado puede expresarse como:

$$\mu_{B^*}(y) = \sup [\mu_{A^*}(x) * \mu_{A \rightarrow B}(x, y)] \quad (\text{Ec. 4.20})$$

Dónde la función característica en aplicaciones de lógica difusa se constituye con los operadores mínimo y producto:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min [\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y) \quad (\text{Ec. 4.21})$$

#### 4.1.4.3. Reglas difusas

Existen dos caminos para obtener un conjunto de reglas correspondiente a un conjunto de datos numéricos:

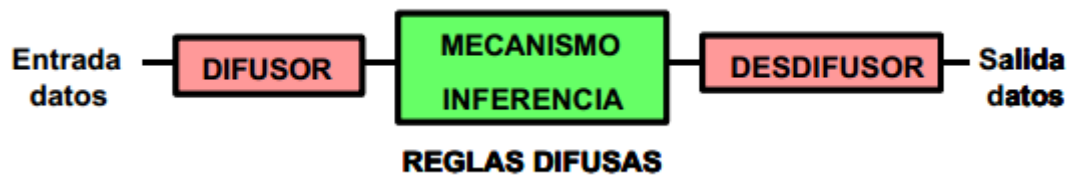
- Dejar que los datos establezcan los conjuntos difusos que aparecen en los antecedentes y los consecuentes
- Predefinir los conjuntos difusos para antecedentes y consecuentes y luego asociar los datos a esos conjuntos.

Para llegar a obtener el conjunto de reglas del problema se puede partir de considerar todas las combinaciones de reglas posibles. Sin embargo alguna de estas reglas tendrían sentido físico por eso entre las posibles se deben escoger las más adecuadas al problema considerado.

#### 4.1.5. Diagrama de bloques basado en técnicas de lógica difusa

En la figura 4.5 se muestra el diagrama de bloques de un sistema basado en lógica difusa. Tiene tres bloques:

- **BLOQUE DIFUSOR:** a cada variable de entrada se le asigna un grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos difusos considerados mediante las funciones características. Las entradas de este bloque son valores concretos de las variables de entrada y las salidas son grados de pertenencia a los conjuntos difusos considerados.
- **BLOQUE DE INFERENCIA:** bloque que relaciona conjuntos difusos de entrada y salida y que representa a las reglas que definen el sistema. Las entradas de este bloque son valores conjuntos difusos (grados de pertenencia) y las salidas son también conjuntos difusos asociados a la variable de salida.
- **DESDIFUSOR:** mediante mecanismo de inferencia y métodos matemáticos de desdifusion obtiene un valor concreto de la variable de salida, el resultado.



**Figura 4.5.** Diagrama de bloques de un sistema basado en lógica difusa

##### **4.1.5.1 Mecanismo de inferencia**

Los Mecanismos de inferencia usan los principios de la lógica explicados en 4.2.1.4.

El bloque de inferencia realiza la traducción matemática de las reglas difusas. Las reglas más utilizadas son de la forma:

**"Si  $u_1$  es  $A_1$  y  $u_2$  es  $A_2$  y  $u_3$  es  $A_3$  ENTONCES  $v$  es  $B$ "**

Para procesar la información contenida en las reglas y obtener un resultado se deben elegir los operadores matemáticos que corresponden a los operadores lógicos siguientes:

- Conectivos lógicos: Y (AND), O (OR), y NO (NOT)
- ENTONCES ( $\rightarrow$ ): implicación
- Unión de las reglas  $\oplus$ : agregación

#### 4.1.5.1.1 Conectivos lógicos entre antecedentes

Existen tres tipos de conectivos lógicos:

A	B	AND	A	B	OR	A	NOT A
0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1		
1	1	1	1	1	1		

**Tabla 4.4.** Tablas de verdad de los conectivos lógicos

- AND  $\Rightarrow$  t-norma
- OR  $\Rightarrow$  t-conorma
- NOT  $\Rightarrow$  operadores de negación

Así las tablas correspondientes a la lógica difusa según la Tabla 4.4 se encuentran en la Tabla 4.5.

A	B	T-norma(A,B)	A	B	T-conor(A,B)	A	compl
0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1		
1	1	1	1	1	1		

**Tabla 4.5.** Tablas de verdad para los operadores and, or y not difusos

Toda esta información es posible representarla gráficamente (Figura 4.6):

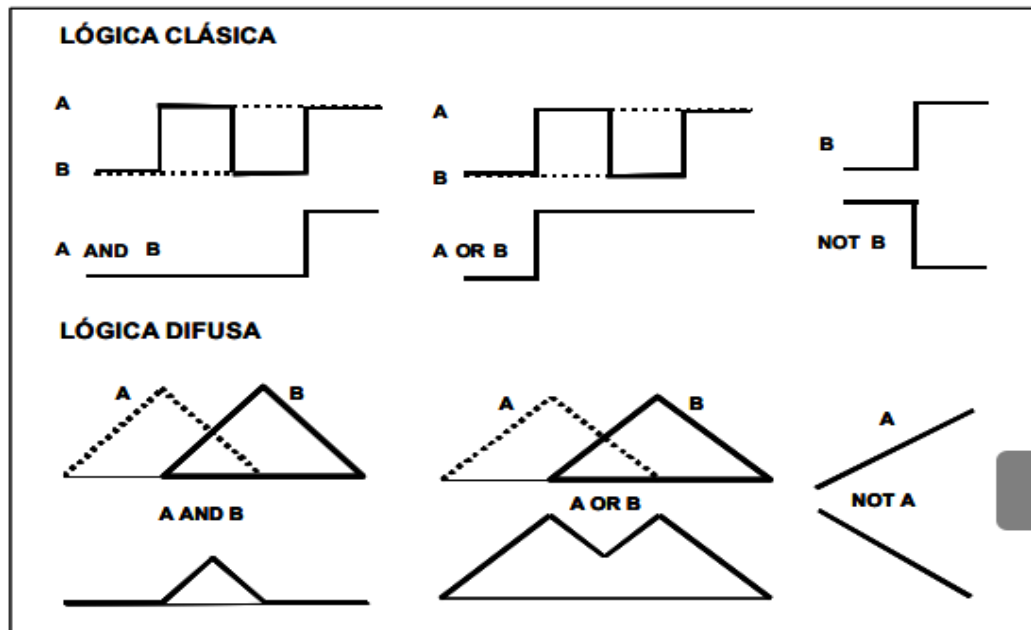


Figura 4.6. Tablas de verdad expresadas gráficamente

Como ya se ha explicado en los apartados anteriores, la intersección AND de dos conjuntos difusos A y B se modela mediante operadores, llamados t-normas, siendo el mínimo y el producto algebraico los casos más utilizados. Así mismo, la unión OR se modela mediante la t-conorma cuyo representante más habitual es el máximo.

De esta forma, sustituyendo en cada regla los conectivos lógicos entre antecedentes por uno de los operadores lógicos equivalentes, se podrá operar con los escalares que representa cada antecedente y obtener como resultado del multi-antecedente un escalar.

Considerando que el antecedente de una regla tiene la forma:

"Si  $x_1$  es  $A_1$  y  $x_2$  es  $A_2$  y  $x_3$  es  $A_3$ .....si  $x_p$  es  $A_p$ ....."

➤ Si se traduce el operador lógico "y" mediante la operación mínimo, el antecedente será:

$$\min \{ \mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_p}(x_p) \}$$

➤ Si se traduce el operador lógico "y" mediante la operación producto, el antecedente será:

$$\text{prod} \{ \mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_p}(x_p) \}$$



#### 4.1.5.1.2. Implicación difusa. Superficies de implicación

El conectivo lógico ENTONCES representa la implicación entre antecedente y consecuente. Para hacer la equivalencia entre la lógica proposicional o clásica y la lógica difusa se debe introducir una t-norma. En cada regla, la implicación se realiza de la siguiente forma:

- Si se elige el operador de mínimo:

$$\mu_{Bm} * (y) = \min \{ \text{"escalar resultado del antecedente"}, \mu_{Bm}(y) \}$$

Es decir el escalar resultante del antecedente modifica el conjunto difuso de salida y pasa de ser B a B\* y la función característica quedaría truncada por el valor escalar que resulte del antecedente.

- Si se elige el operador de producto:

$$\mu_{Bm} * (y) = \text{prod} \{ \text{"escalar resultado del antecedente"}, \mu_{Bm}(y) \}$$

Gráficamente la función característica del conjunto difuso de salida quedará escalada según el valor del antecedente.

Cada regla define una superficie de implicación. Para cada posible valor del antecedente, se puede obtener el conjunto difuso que resulta de realizar la implicación. La superposición de todos estos conjuntos difusos forma la superficie de implicación de esa regla.

Todas las reglas que tienen el mismo consecuente definirán la misma superficie de implicación ya que la superficie se construye para todos los valores que puede tomar el antecedente. Al particularizar la implicación para el antecedente resultante de cada regla, se obtiene el resultado concreto de esa regla, representando en la superficie de implicación por la intersección de esta superficie con el plano vertical que pasa por el antecedente.

#### 4.1.5.1.3 Agregación lógica

Una vez evaluadas las reglas y obtenidos los conjuntos de salida modificados, hay que realizar la agregación de todas las reglas para obtener el resultado único de la actuación de todas ellas.

- Si se elige el operador máximo para realizar la agregación, del conjunto difuso de salida será:

$$\mu_B(y) = \max \{ \mu_{B_1}(y), \mu_{B_2}(y), \dots, \mu_{B_n}(y) \} \quad (\text{Ec. 4.22})$$

- Si se elige el operador suma para realizar la agregación, del conjunto difuso de salida será:

$$\mu_B(y) = \text{sum}\{\mu_{B_1}(y), \mu_{B_2}(y), \dots, \mu_{B_n}(y)\} \quad (\text{Ec. 4.23})$$

#### 4.1.5.2. Métodos de desdifusión

El bloque desdifusor realiza la función contraria al difusor. El difusor tiene como entradas valores concretos de las variables de entrada y como salidas grados de pertenencia a conjuntos difusos (entre 0 y 1). La entrada al bloque desdifusor es el conjunto difuso de salida, resultado del bloque de inferencia y la salida es un valor concreto de la variable de salida. Para obtener un resultado escalar resultado de la agregación de todas las reglas del conjunto difuso de salida existen métodos matemáticos. Los Más sencillos son:

- Método del máximo: se elige como valor para la variable de salida aquel para el cual la función característica del conjunto difuso de salida es máxima.
- Método del centroide: utiliza como salida del sistema el centro de gravedad de la función característica de salida. Matemáticamente:

$$\bar{y} = (\int y \mu_B(y) dy) / (\int \mu_B(y) dy) \quad (\text{Ec. 4.24})$$

Es el método más empleado ya que da una solución única aunque a veces es difícil de calcular.

- Método de la altura: se calcula para cada regla el centro de gravedad del conjunto difuso de salida  $B_m$  y después se calcula la salida del sistema como la media ponderada:

$$y_k = (\int \bar{y}_m \mu_{B_m}(\bar{y}_m) dy) / (\int \mu_{B_m}(\bar{y}_m) dy) \quad (\text{Ec. 4.25})$$

## 4.2 Procedimiento para definir un control difuso

### 4.2.1. Definición de variables

El proceso comienza definiendo las variables de salida del sistema y sobre ellas se estructuran las variables de entrada [27].

### 4.2.2. Definición de los espacios entrada-salida.

En segundo lugar se han de establecer las etiquetas lingüísticas para las variables, la elección de la forma de la función que mejor representa las variables y el rango de valores entre los que se mueven las variables.

### 4.2.3. Fuzzificación de las variables de entrada

Con cada una de las entradas, el valor recibido al controlador es comparado con su respectivo espacio; y así se obtiene el cluster o espacio al que pertenece.

Una vez recibido un valor de entrada para cada variable se devuelve el grado de pertinencia de cada uno a su respectivo espacio, en los clusters que abarquen al valor.

Debido a la partición simétrica de los espacios, la variable sólo puede pertenecer a uno o a dos clusters, resultando en una o dos funciones de pertenencia por espacio únicamente

### 4.2.4. Base del conocimiento

Es el punto de partida para la generación del conjunto de reglas sobre las que se rige la inferencia.

### 4.2.5. Proceso de inferencia

El Proceso de inferencia más utilizado es el de máximo-mínimo, conocido también como Mandami basado en:

- Valores de entrada: el resultado de la fuzzification arroja ciertos valores de membresía para los distintos clusters en cada espacio de entrada (véase Figura 4.7).

## CAPÍTULO 4: LÓGICA FUZZY

$\mu_{A1}(x) = 0.7$ ; Valor de membresía de la variable  $x$  en la entrada A, cluster 1

$\mu_{A2}(x) = 0.3$ ; Valor de membresía de la variable  $x$  en la entrada A, cluster 2

0 para los demás clusters del espacio de entrada A

$\mu_{B1}(y) = 0.4$ ; Valor de membresía de la variable  $y$  en la entrada B, cluster 1

$\mu_{B2}(y) = 0.6$ ; Valor de membresía de la variable  $y$  en la entrada B, cluster 2

0 para los demás clusters del espacio de entrada B

**Figura 4.7.** Ejemplo de variables de entrada proceso de inferencia

➤ Aplicación de reglas: las pertenencias que existen se aplican sobre la base de reglas para saber en que cluster del espacio de salida se produce el consecuente de cierta combinación de antecedentes descritos en dichas reglas (véase Figura 4.8).

R1: Si A1 y B2 entonces C3 ←

R2: Si A3 y B1 entonces C2

.

.

.

Rn: Si A2 y B2 entonces C5 ←

**Figura 4.8.** Ejemplo de aplicación de reglas

➤ Membresías de salida: El valor de membresía que se hereda al cluster de salida en cada regla cumplida, es el valor mínimo de las membresías de los clusters de los espacios de entrada que se involucran en la regla (véase Figura 4.9).

$\mu_{C3}(z) = 0.6$ ; Valor de membresía de la variable  $z$  en la salida C, cluster 3

$\mu_{C5}(z) = 0.3$ ; Valor de membresía de la variable  $z$  en la salida C, cluster 5

**Figura 4.9.** Ejemplo de membresías de salida

➤ Formación del polígono: después de aplicar todas las reglas que se cumplen podemos tener varios valores de membresía para un mismo cluster del espacio de salida si varias reglas heredaron de él. Es necesario, adicionalmente, formar el polígono de salida que refleja el valor de las membresías a lo largo de los clusters del espacio de salida. Para obtener el producto final del proceso de inferencia se debe hacer un barrido por cada cluster, tomando siempre el máximo valor de membresía que presente en una regla. Entre clusters, se debe tomar también como valor de membresía, la mayor de cada uno.

#### 4.2.6. Defuzzificación

El método más utilizado de defuzzificación es el del centroide o por centro de área. Es simple ya que calcula el centro de la gravedad de la figura siguiendo la Ecuación 4.26 que en el caso de sistemas discretos equivale a la ecuación 4.27.

$$z^* = \frac{\int \mu_c(z)zdz}{\int \mu_c(z)dz} \quad (\text{Ec.26})$$

$$z^* = \frac{\sum \mu_e(z)z}{\sum \mu_e(z)} \quad (\text{Ec.27})$$

Dónde  $z^*$  es el centroide.

# CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO

---

## 5.1. CARSIM

El objetivo del proyecto es la creación de un sistema de control de la suspensión de un coche con un controlador activo y otro pasivo, de tal manera que el comportamiento del vehículo sea mejor con el controlador activo que con el pasivo, ya que en el activo se puede influir en su comportamiento.

CarSim es un software comercial que predice el comportamiento de los vehículos como respuesta a los controles del conductor: dirección, aceleración, frenos, embrague y desplazamiento dadas unas condiciones externas como la geometría de la carretera, el coeficiente de fricción o el viento.

La pantalla principal de Carsim se muestra en la figura 5.1.

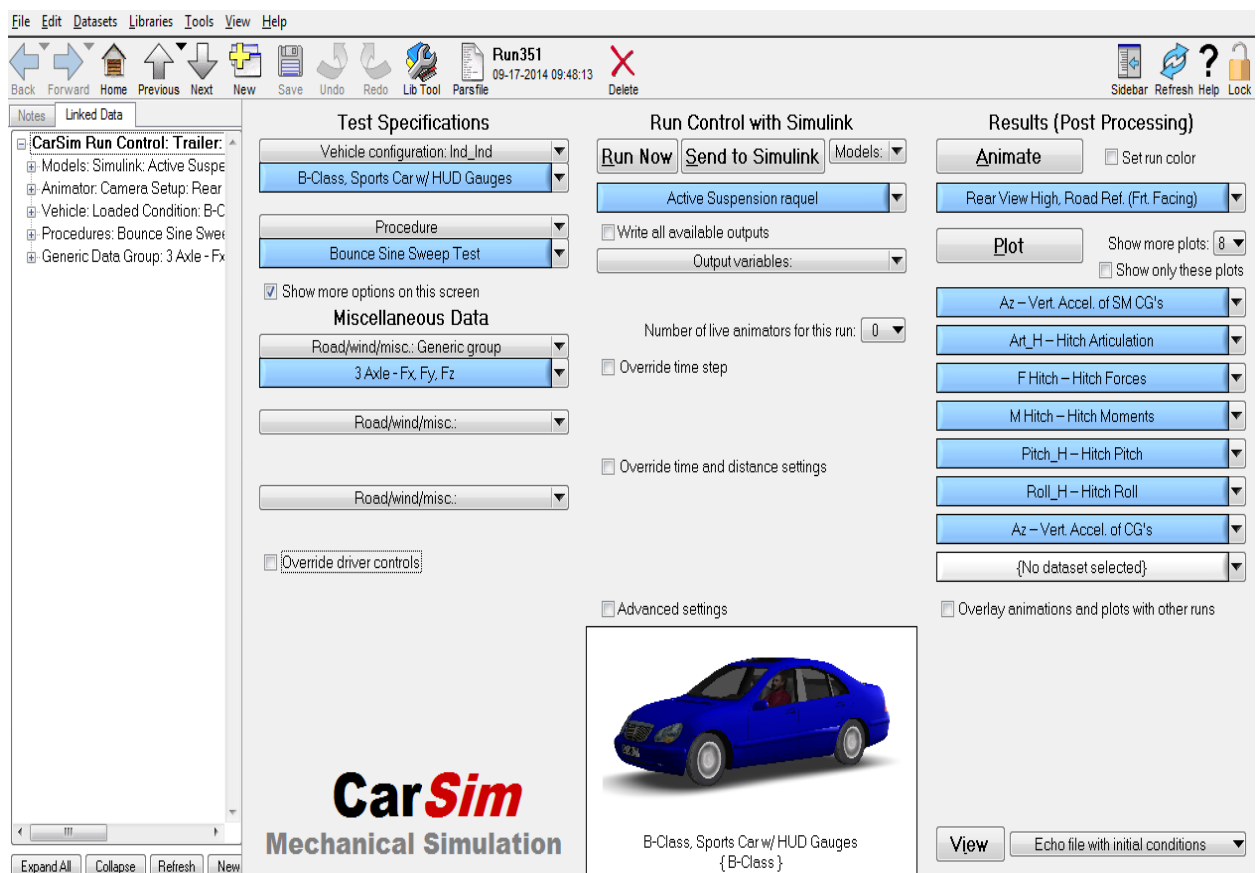


Figura 5.1. Pantalla principal de CARSIM

## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO

---

Se observa en la figura 5.1 que existen multitud de menús. Los que se van a utilizar y los más importantes son los marcados en la figura 5.2 con números:

1-Tipo de vehículo: en este caso se ha utilizado un vehículo de clase B.

2-Tipo de señal de entrada: se ha utilizado una onda sinusoidal.

3-Envío a Simulink: esta pestaña permite la conexión de Carsim con Simulink.

4-Selección de carpeta: en este caso se han creado dos archivos llamados `Active_Suspension_raquel` (que será el correspondiente al sistema con controlador, es decir la suspensión activa) y `Passive_Suspension_raquel` (que será el correspondiente al sistema sin controlar, es decir el pasivo). Ambos han sido modificaciones del archivo `Active_Suspension` dado en CARSIM. Esto permite la modificación de nuestros archivos sin comprometer el buen funcionamiento de la simulación. Estas carpetas se crean a través del icono NEW y posteriormente en la siguiente pantalla que aparece (véase figura 5.3) se elige el nombre y se hace “click” en Set.

5-Elección del modelo Simulink para la conexión de Carsim con Simulink.

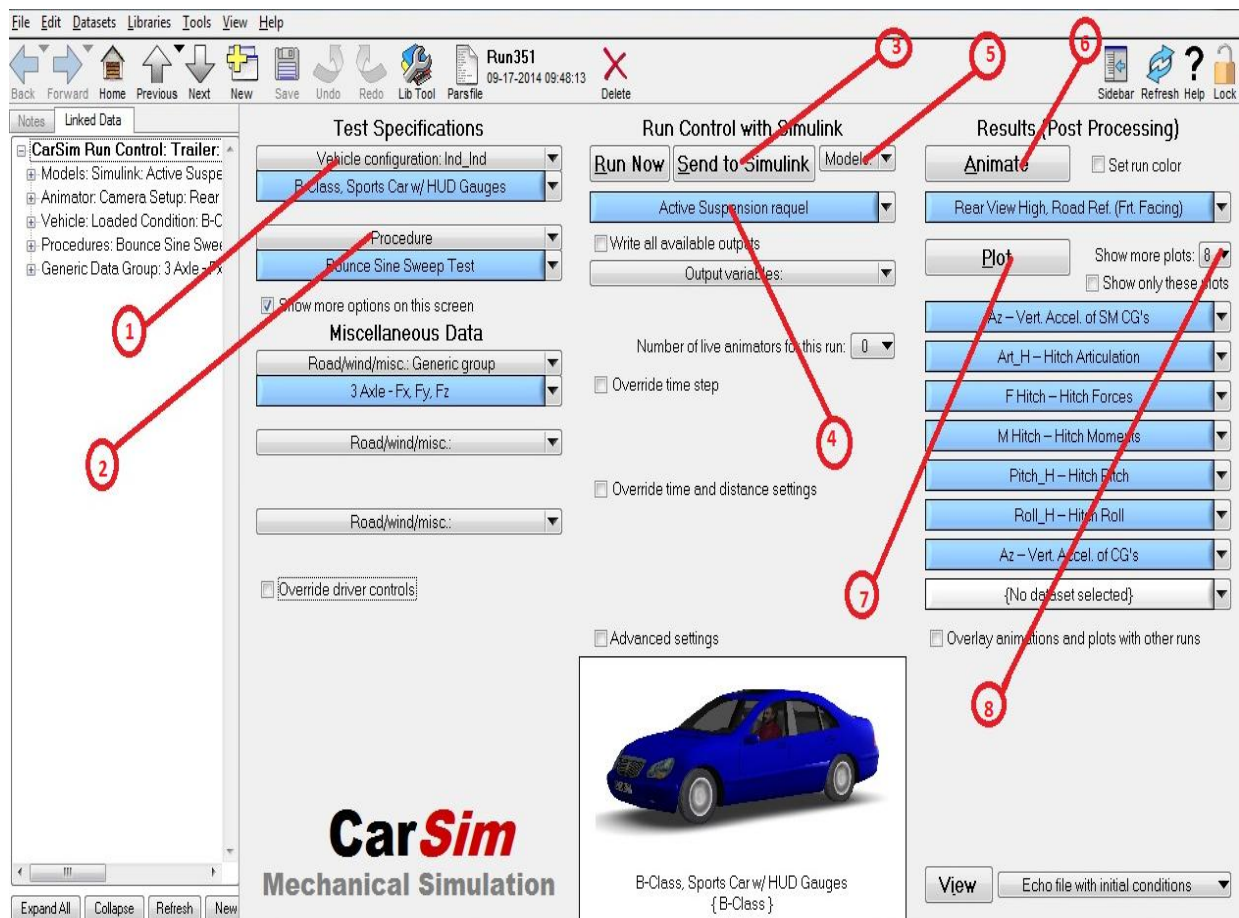
6-Animación.

7-Gráficas.

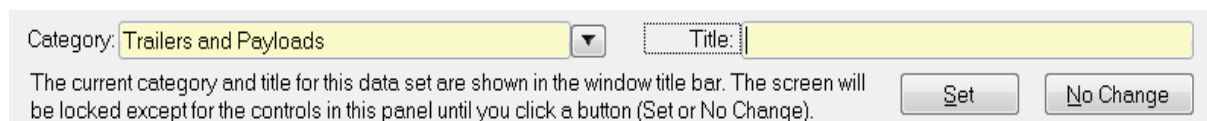
8-Selección del número de gráficas que se quiere representar.



## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO



**Figura 5.2.** Menús de la pantalla principal de CARSIM



**Figura 5.3.** Creación de una carpeta en Carsim

## 5.2. Simulink de Matlab

Simulink es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Admite el diseño y la simulación a nivel de sistema, la generación automática de código y la prueba y verificación continua de los sistemas embebidos.

Simulink ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y solvers para modelar y simular sistemas dinámicos. Se integra con MATLAB, lo que permite incorporar algoritmos de este programa en los modelos y exportar los resultados de la simulación de CARSIM a MATLAB para llevar a cabo más análisis.

Una vez creados los archivos en CARSIM, y seleccionados los datos descritos en la numeración anterior se manda el modelo a Simulink y se pasa a la modificación del sistema dado en Carsim (Figura 5.4).

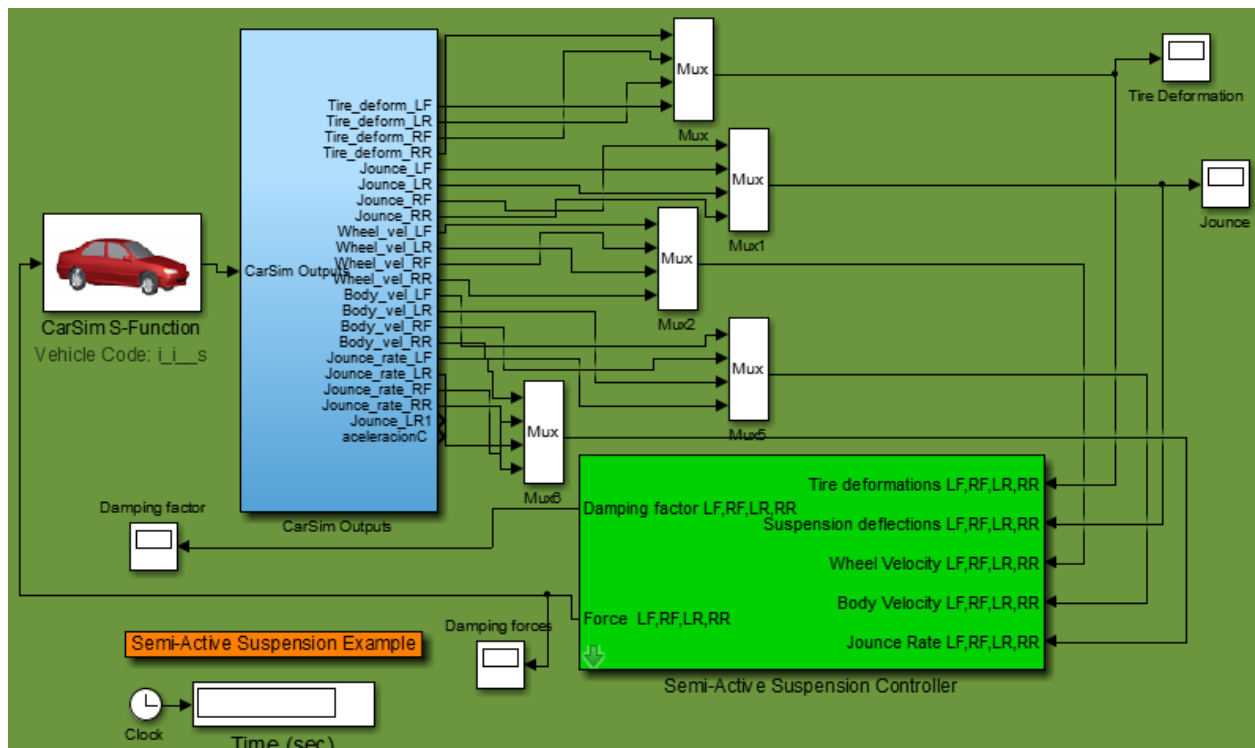


Figura 5.4. Modelo dado por Carsim

## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO

En las figuras 5.5 y 5.6 se muestran los modelos creados para la suspensión activa y la pasiva respectivamente.

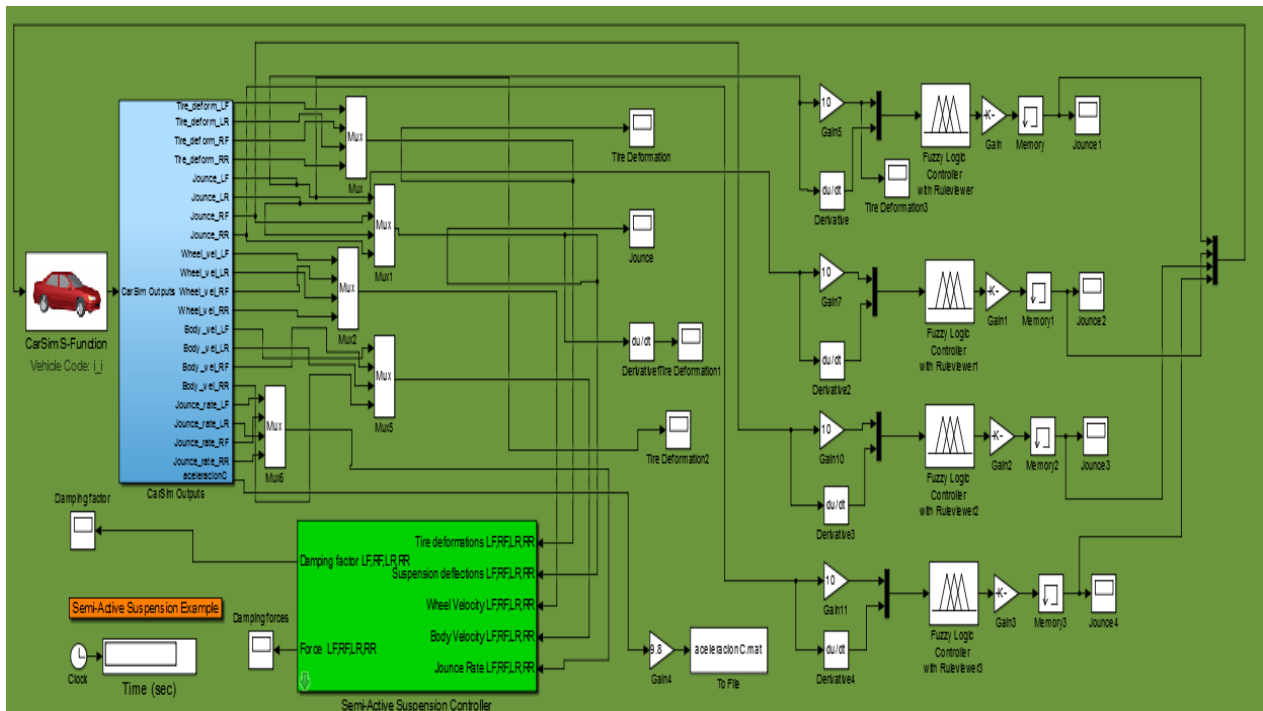
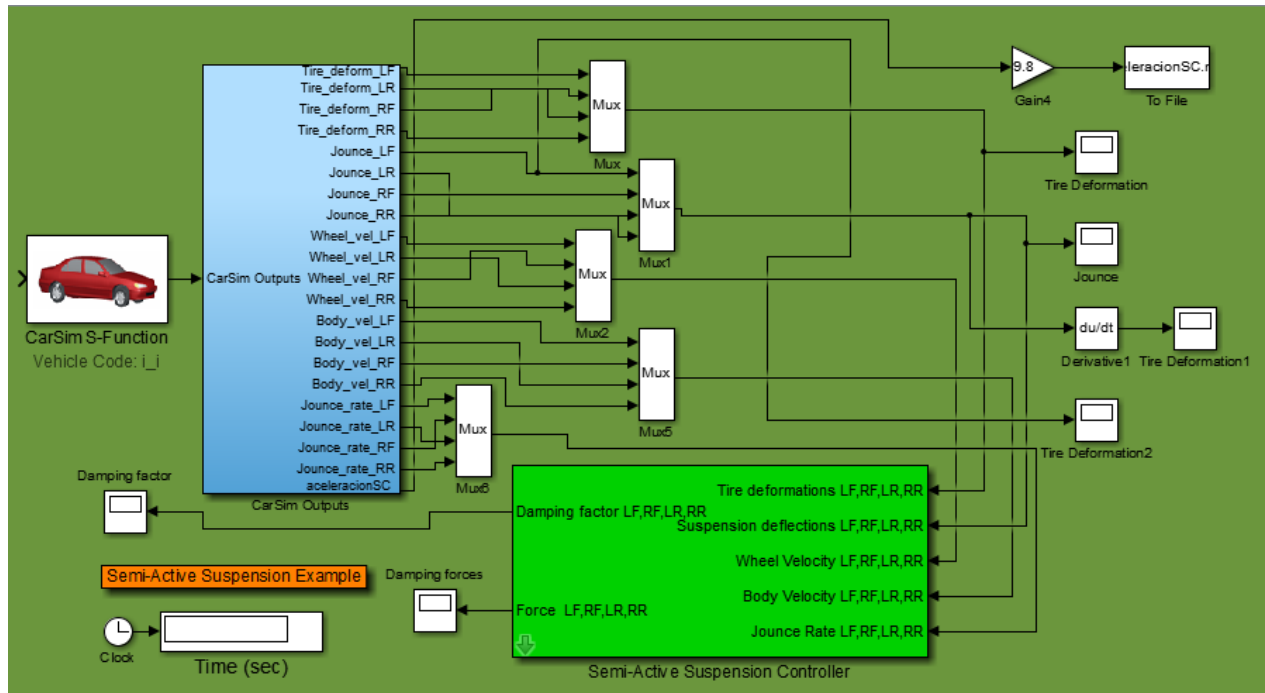



Figura 5.5. Modelo suspensión activa

## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO



**Figura 5.6.** Modelo suspensión pasiva

Para la elección de los bloques de Simulink, se hace “click” sobre el icono  y del menú desplegado se seleccionan los que se desee. Los bloques utilizados en sus respectivos menús se muestran en las figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 5.11 y 5.12 y se describen a continuación:

- Mux: permite la unión de un número “n” de entradas para dar una única salida.
- Scope: gráficos.
- Gain (ganancia): permite la multiplicación o división de los valores lo que permite trabajar en el fuzzy con el rango que se quiera. En nuestro caso los rangos son [-1,1].
- Derivative: bloque de derivación.
- Memory: variable de memoria.
- To file: archivo .mat que se encarga de recoger tablas de datos de aceleración que se utilizarán posteriormente para el cálculo del rms y del psd (ambas funciones están explicadas más adelante)
- Fuzzy: compuesto en este caso por dos variables de entrada, el desplazamiento y la derivada del mismo, es decir, la velocidad y una única salida, la fuerza.

## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO

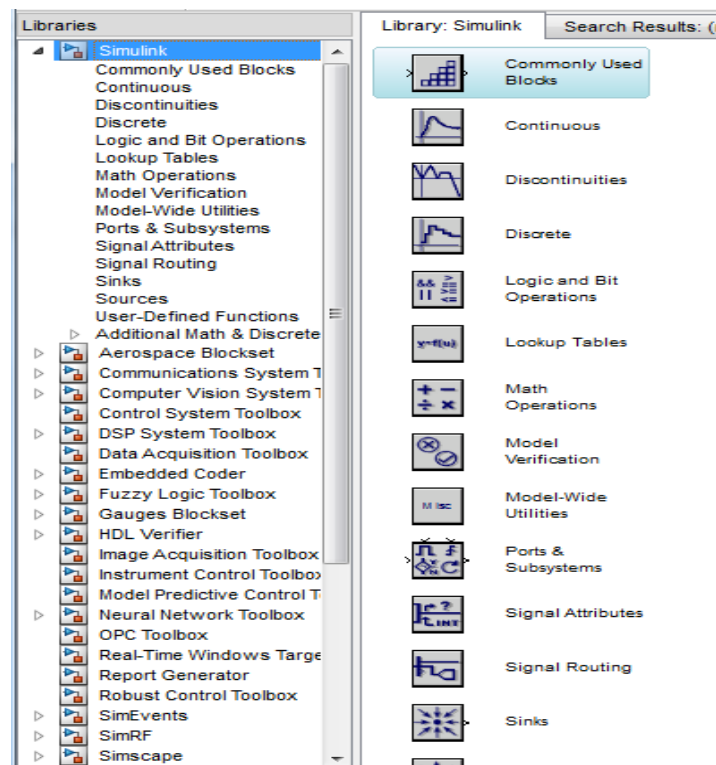


Figura 5.7. Menú bloques simulink

## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO

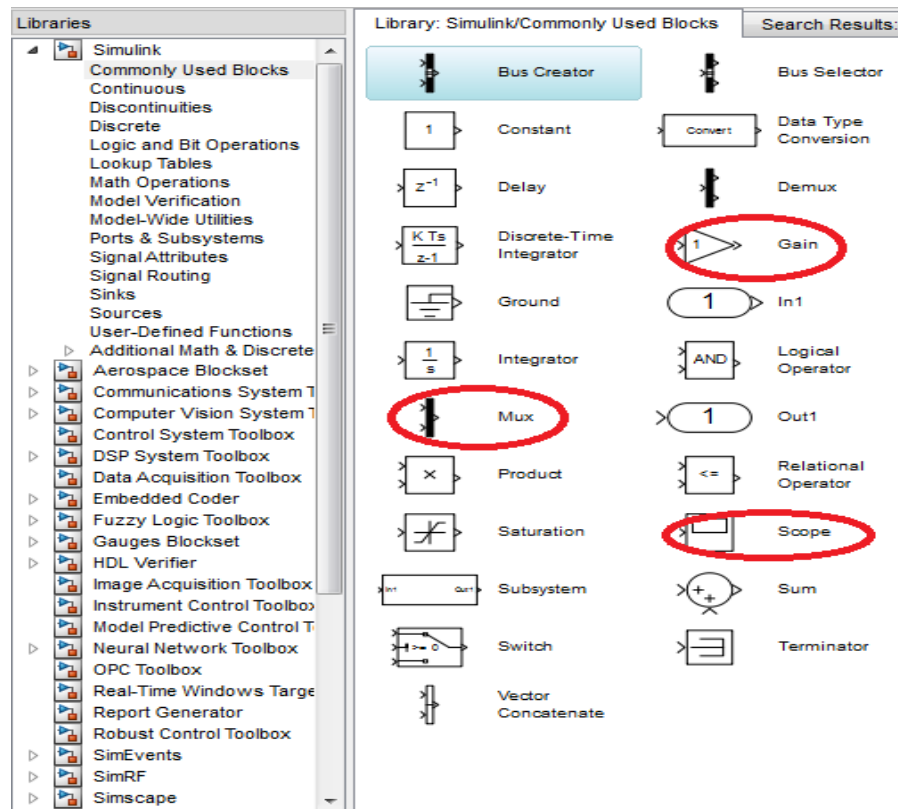


Figura 5.8. Mux, scope y gain

## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO

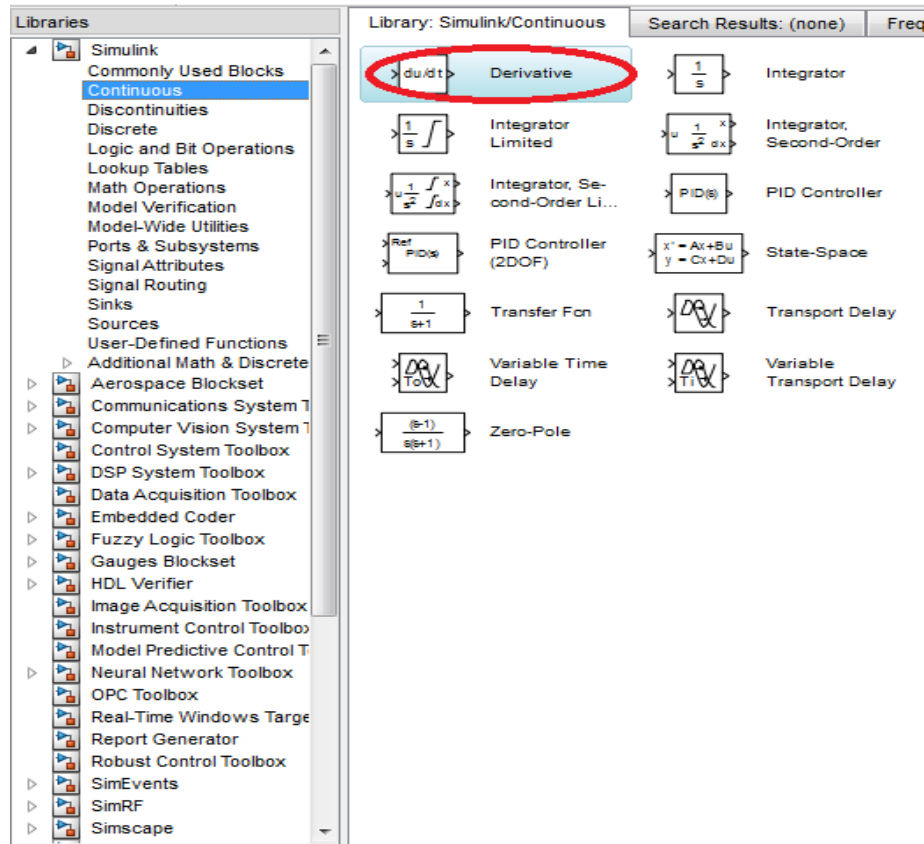


Figura 5.9. Bloque derivativo





## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO

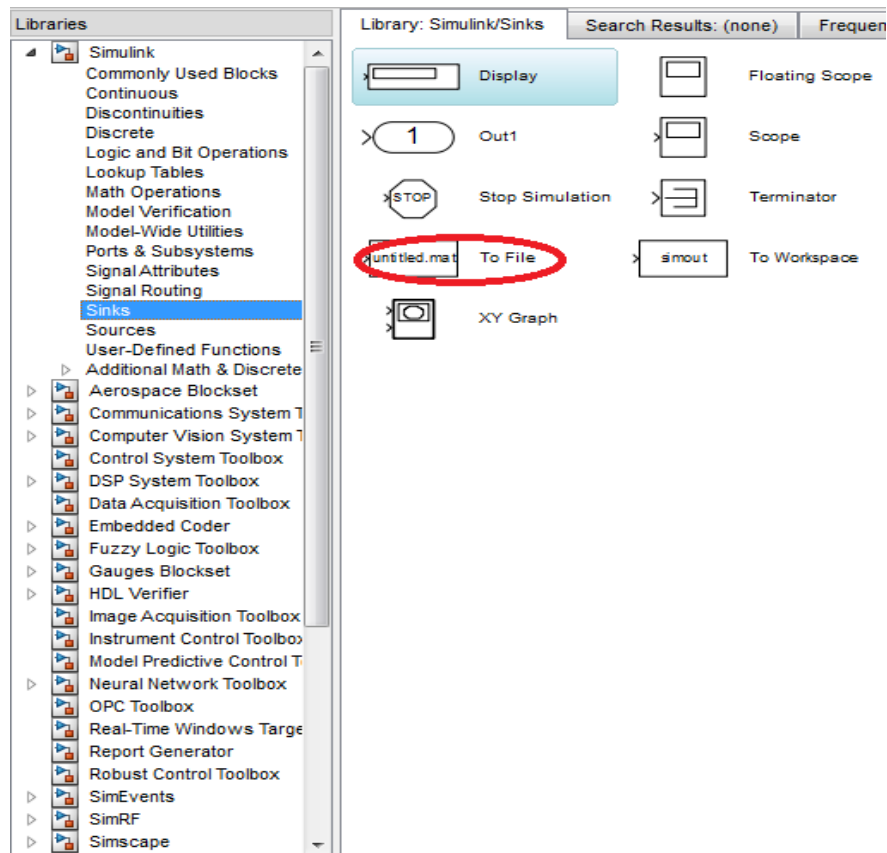
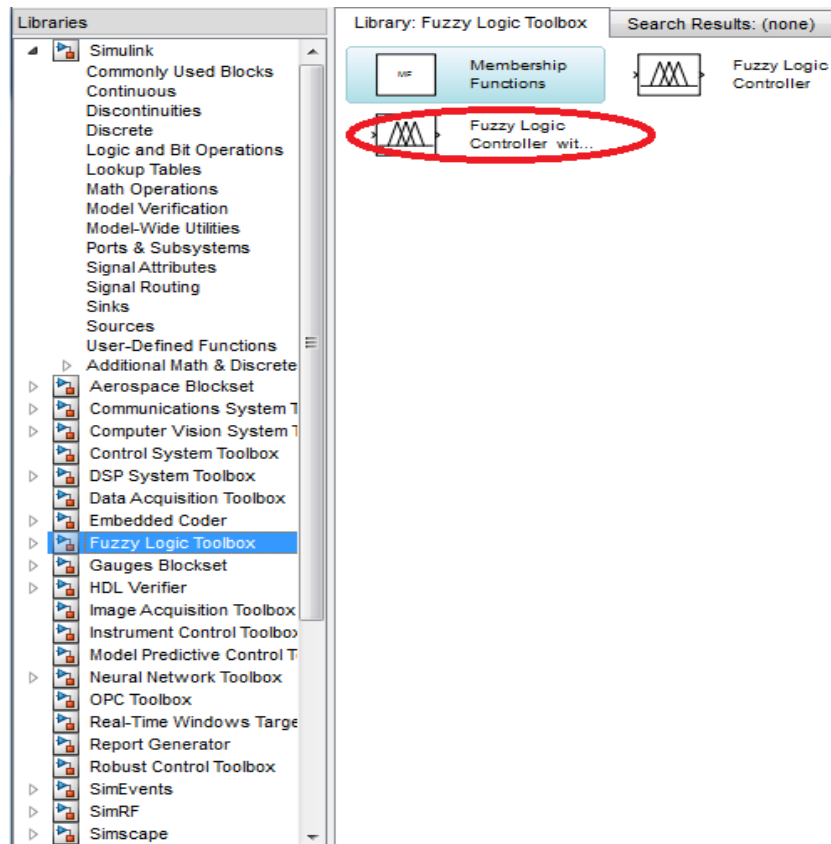


Figura 5.11. Bloque “to file”

## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO



**Figura 5.12.** Bloque fuzzy

Una vez contruidos los controladores con los bloques correspondientes ha de crearse el fuzzy. Para ello se escribe fuzzy en la ventana principal de Matlab (véase figura 5.13) y en la pestaña que salta a continuación se crea un fichero nuevo y se añaden las variables que se deseen junto con las reglas (véase figura 5.14). En este caso, el archivo se ha llamado “veinteseisdelseis2.fis”. Haciendo “click” en cada variable aparece una nueva ventana donde podemos variar las gráficas. Aquí se observa que se han asignado tres grados de tamaño a cada variable:

- desplazamiento: variable “d”
- velocidad: variable “v”
- fuerza: variable “f”

Con los grados de tamaño:

- low: bajo “l”
- medium: medio “m”

## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO

- big: grande “b”

Combinando las variables con sus grados de tamaño se obtienen tres gráficas para cada variable con el rango escogido, el tipo de gráfica y los parámetros (véase figura 5.15). Las gráficas “tramp” son las usadas para los extremos y las triangulares para la gráfica central. Una vez codificados todos estos parámetros se pasa a la elaboración de las reglas (véase figura 5.16).

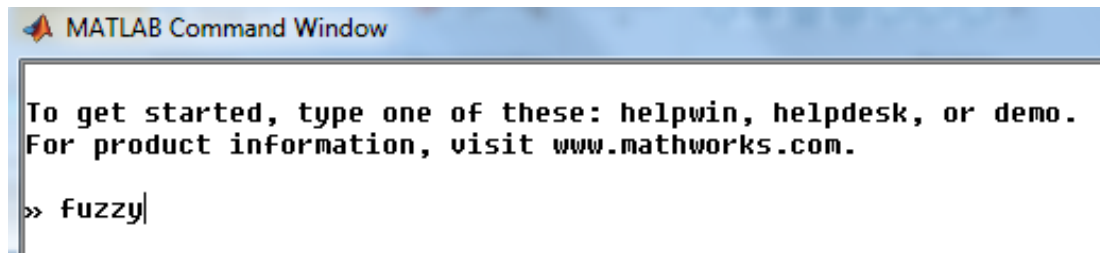


Figura 5.13. Creación de fuzzy

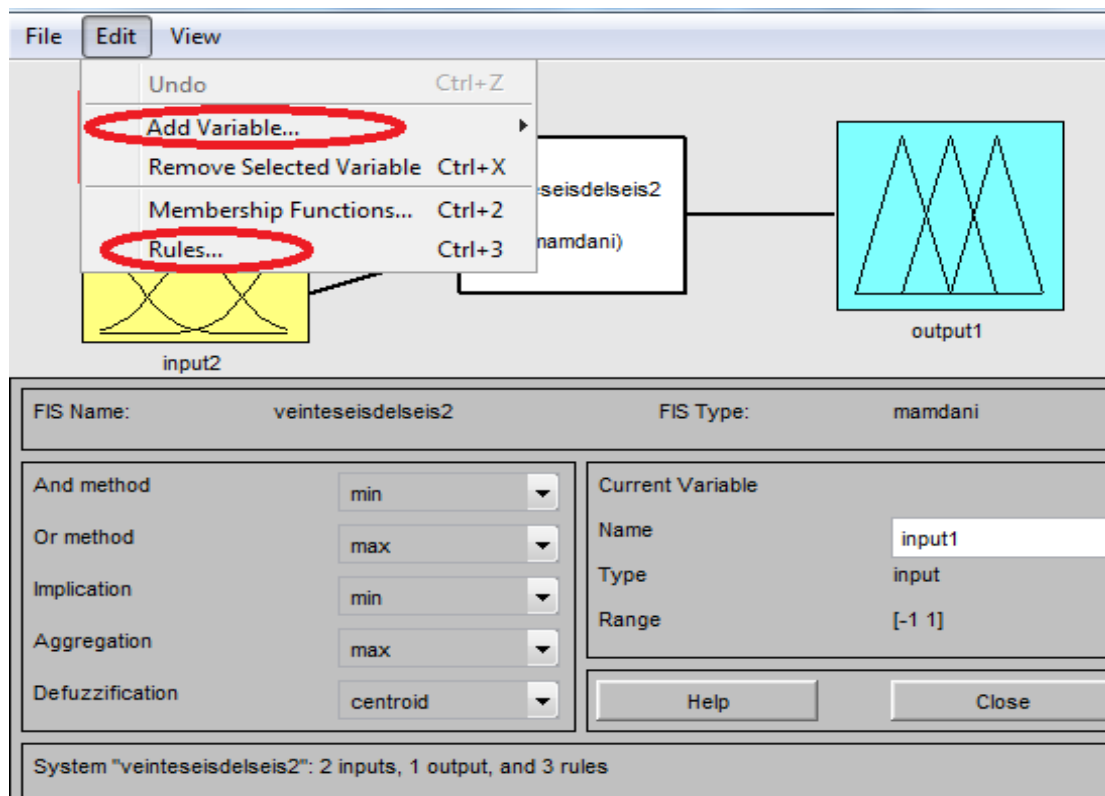


Figura 5.14. Creación del archivo .fis

## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO

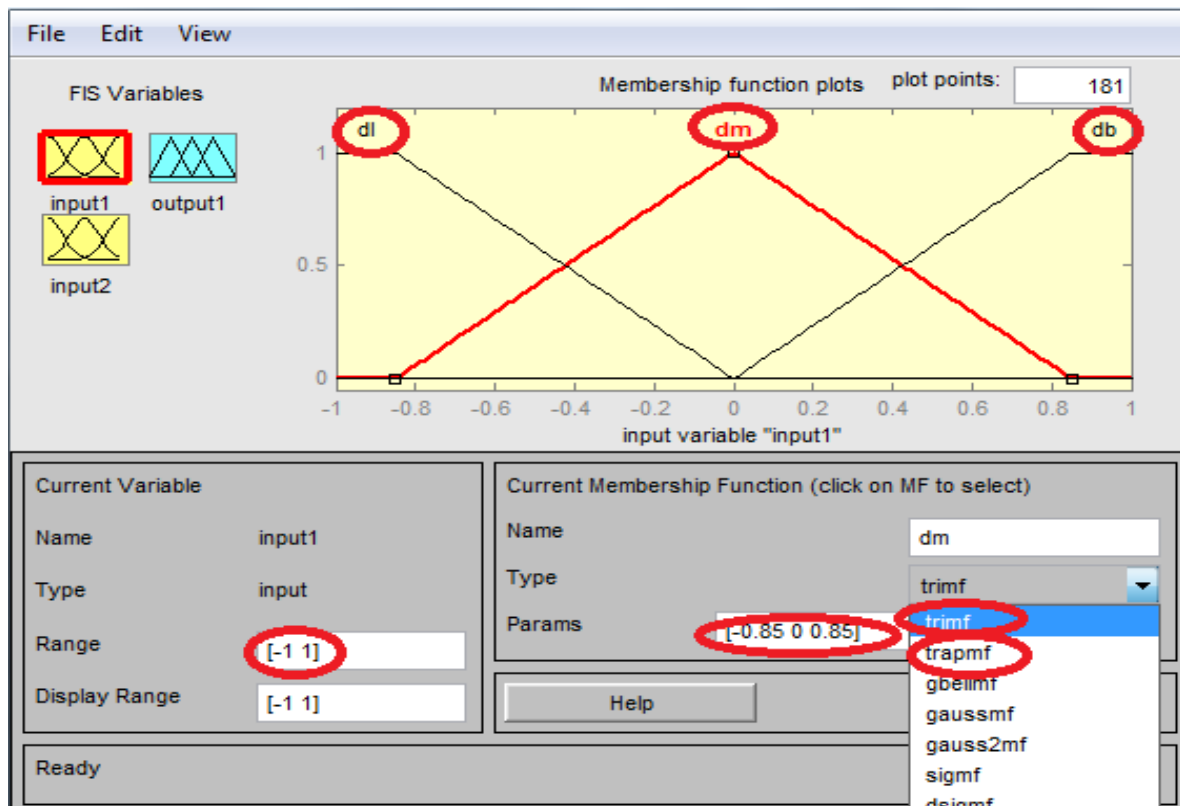
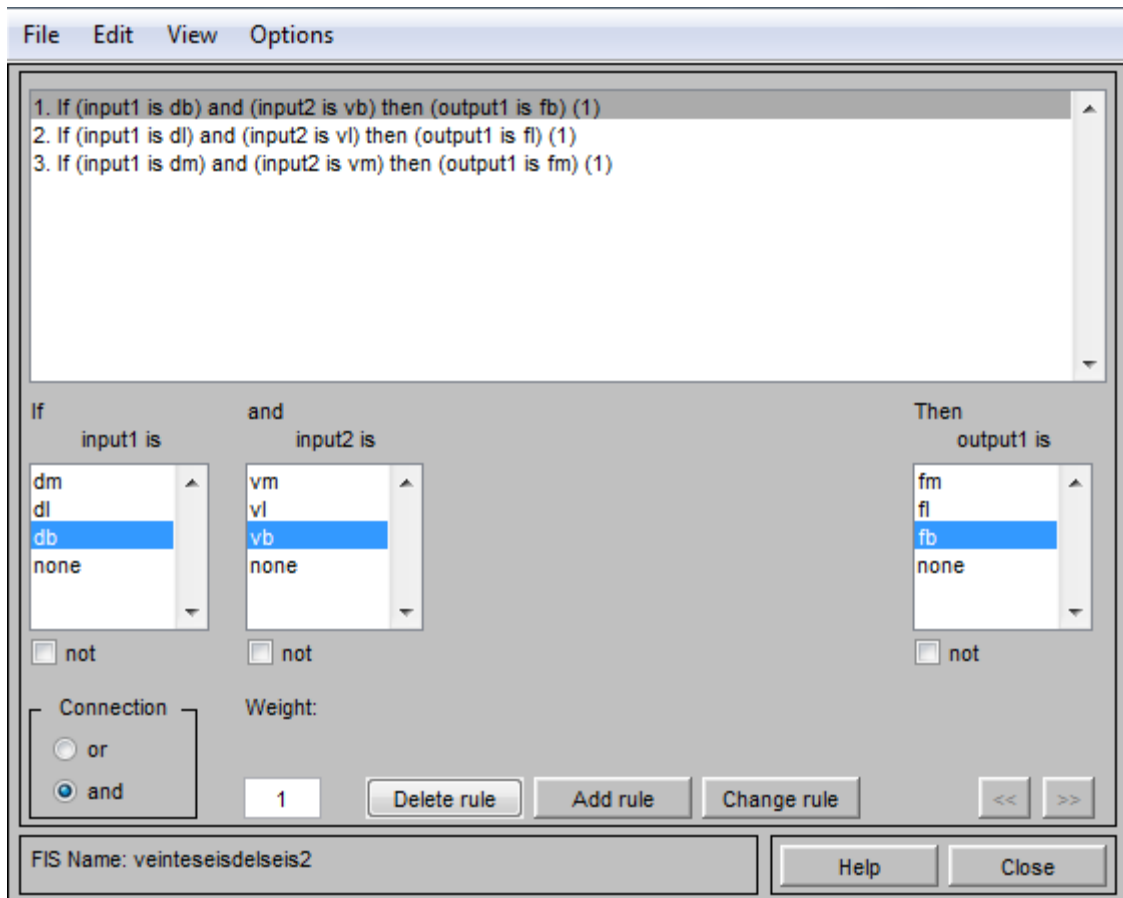


Figura 5.15. Creación de gráficas fuzzy

## CAPÍTULO 5: SOFTWARE UTILIZADO



**Figura 5.16.** Reglas fuzzy

# CAPÍTULO 6: DESARROLLO DEL CONTROLADOR BASADO EN LÓGICA FUZZY

---

## CAPÍTULO 6: DESARROLLO DEL CONTROLADOR BASADO EN LÓGICA FUZZY

---

El desarrollo del controlador requiere del análisis de dos parámetros, descritos a continuación:

### ➤ PSD

PSD o “Power spectral density function” muestra la fuerza de las variaciones como una función de frecuencia. En otras palabras, muestra a qué frecuencias las variaciones son más fuertes, por lo tanto, la unidad de la función PSD es energía por frecuencia. Se puede obtener la energía dentro de un rango de frecuencias determinado mediante la integración de la función. La computación del PSD es hecha directamente por el método llamado FFT o por autorcorrelación de la función y transformándola después [28].

PSD es una herramienta muy útil si se sabe identificar las señales de oscilación en los datos de tiempo ya que ello permite conocer la amplitud de las mismas, lo que nos permite comprobar que las amplitudes a frecuencias aproximadamente menores de 3Hz sean suficientemente bajas para que no perjudiquen el confort de los pasajeros. Además, se puede usar en casos que no conozcamos las señales de tiempo ya que se puede pasar de tiempo a frecuencia fácilmente.

Sin embargo esta función tiene algunos fallos. En primer lugar es posible que en la medición de las oscilaciones por ejemplo, de una máquina o de una suspensión, puedan existir oscilaciones secundarias no debidas a la propia máquina o a la suspensión respectivamente. Esto es lo que se conoce como “ruido” y puede alterar el resultado. En segundo lugar en picos periódicos llamados armónicos pueden contaminar el resultado y mezclar intervalos. Por último, cuando se quiere medir el ancho de banda de por ejemplo una transmisión digital, el patrón de los datos digitales no es normalmente regular lo que origina errores. En este proyecto PSD nos permite analizar la aceleración vertical del vehículo en función de la frecuencia.

### ➤ RMS

La función RMS realiza un análisis en el tiempo en función de la variable a estudiar. En este caso se estudian las variables desplazamiento y velocidad.

Para la implementación de los resultados basta con escribir en la pantalla principal de Matlab “rms(‘aceleracionC.mat’)” para llamar al archivo .mat creado para la suspensión activa o “rms(‘aceleracionSC.mat’)” para llamar al archivo .mat creado para la suspensión pasiva. Del mismo modo para llamar a la función PSD se escribe “dibujar(‘aceleracionC.mat’)” y “dibujar(‘aceleracionSC.mat’)” para la actuación con control o sin control respectivamente.

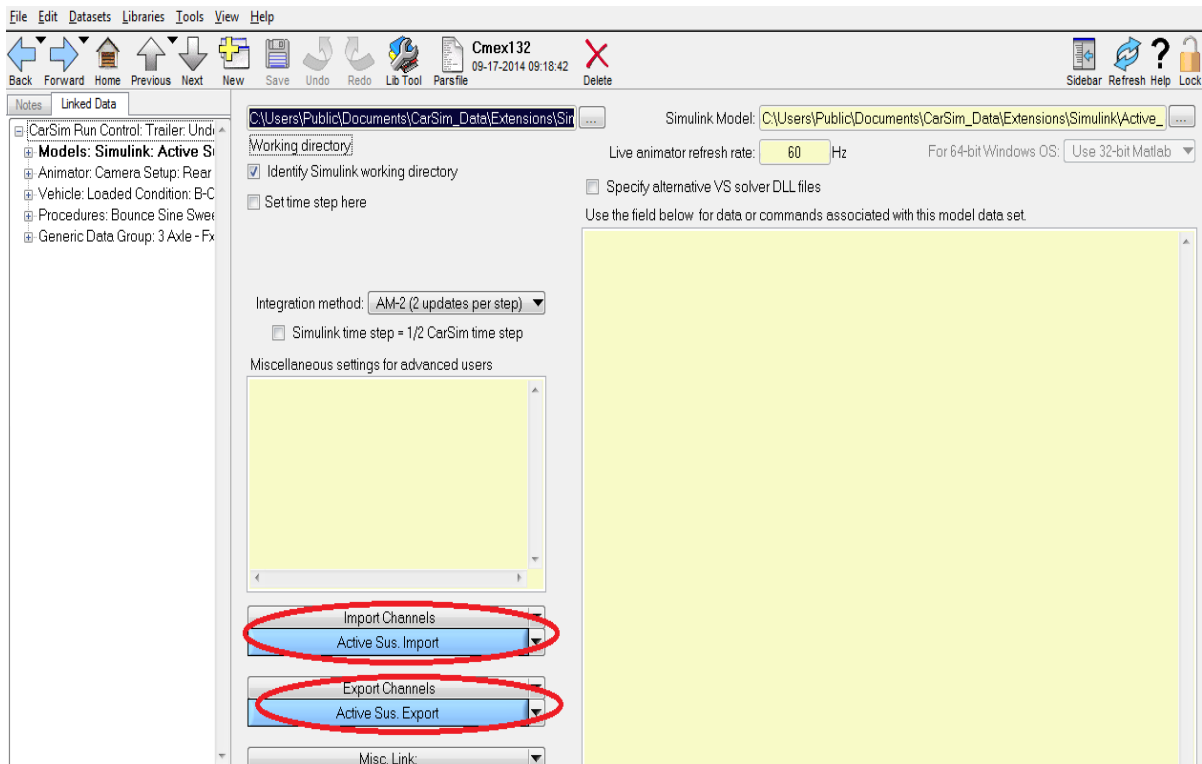
Para que estas funciones operen ha sido necesaria la adición de una variable de salida, la aceleración del centro de gravedad según el eje vertical. Para encontrar esta variable en el menú de Carsim hay que seguir los siguientes pasos:

1-A través del menú de CarSim clicar en el archivo Active\_Suspension\_raquel (número 4 de la figura 5.2).

## CAPÍTULO 6: DESARROLLO DEL CONTROLADOR BASADO EN LÓGICA FUZZY

2-En la nueva pantalla accediendo a “export channels” (véase figura 6.1) aparecen las variables de salida.

3-Pulsando en el botón “view spreadsheet” aparece un archivo word dónde se indican las siglas y la descripción de todas las variables (véase figura 6.2).



**Figura 6.1.** Menú variables Carsim

Una vez encontrada la variable se añade a la lista. En nuestro caso la variable aceleración se ha llamado “aceleracionC”. Para añadirla se pulsa en el bloque de las variables de salida (bloque verde) y posteriormente aparece una nueva ventana donde la añadimos (véase figura 6.3, la variable añadida corresponde al número 21).¶



## CAPÍTULO 6: DESARROLLO DEL CONTROLADOR BASADO EN LÓGICA FUZZY

i_i_outputs.xls [Sólo lectura]						
	A	B	C	D	E	F
1	Name	Units	Type	Component	Full Name	Legend L
2	AAx	rad/s <sup>2</sup>	Angular acce	Chassis moti	Roll acc. (bo	Vehicle r
3	AAy	rad/s <sup>2</sup>	Angular acce	Chassis moti	Pitch acc. (bo	Vehicle p
4	AAy_L1	rad/s <sup>2</sup>	Angular acce	Wheels	Wheel L1 spi	Wheel L1
5	AAy_L2	rad/s <sup>2</sup>	Angular acce	Wheels	Wheel L2 spi	Wheel L2
6	AAy_R1	rad/s <sup>2</sup>	Angular acce	Wheels	Wheel R1 sp	Wheel R1
7	AAy_R2	rad/s <sup>2</sup>	Angular acce	Wheels	Wheel R2 sp	Wheel R2
8	AAz	rad/s <sup>2</sup>	Angular acce	Chassis moti	Yaw acc. (bo	Vehicle y
9	AA_Eng	rad/s <sup>2</sup>	Angular acce	Powertrain	Engine crank	Engine cr
10	AA_P	rad/s <sup>2</sup>	Angular acce	Chassis moti	Pitch accel. (	Vehicle p

Figura 6.2. Variables de salida

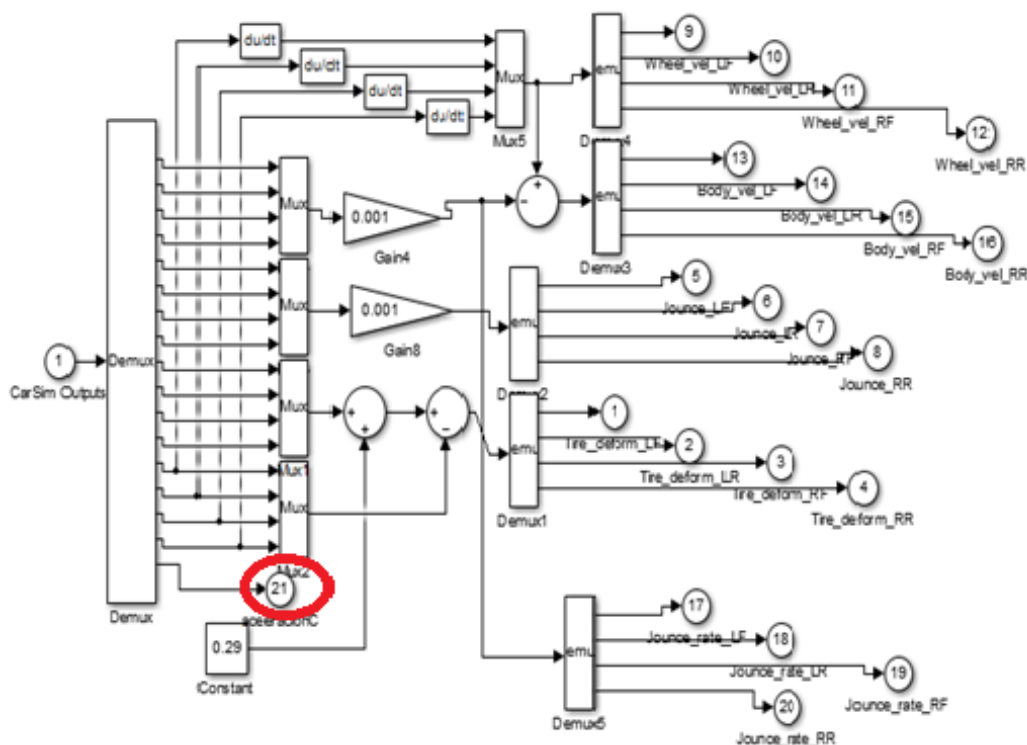



Figura 6.3. Adición variable de salida



## CAPÍTULO 6: DESARROLLO DEL CONTROLADOR BASADO EN LÓGICA FUZZY

---

A partir de aquí todos los archivos y variables necesarios están correctamente creados. El siguiente paso es la obtención de los valores RMS y PSD para distintas gráficas, reglas y parámetros de fuzzy.

Es importante que al realizar cualquier variación en las gráficas fuzzy se exporte el archivo primero “to file” para guardar los cambios y posteriormente a “to workspace”, ya que de no hacerlo no se envía la información a Matlab y da error. Una vez exportados hay que ejecutar dando al play (icono ).

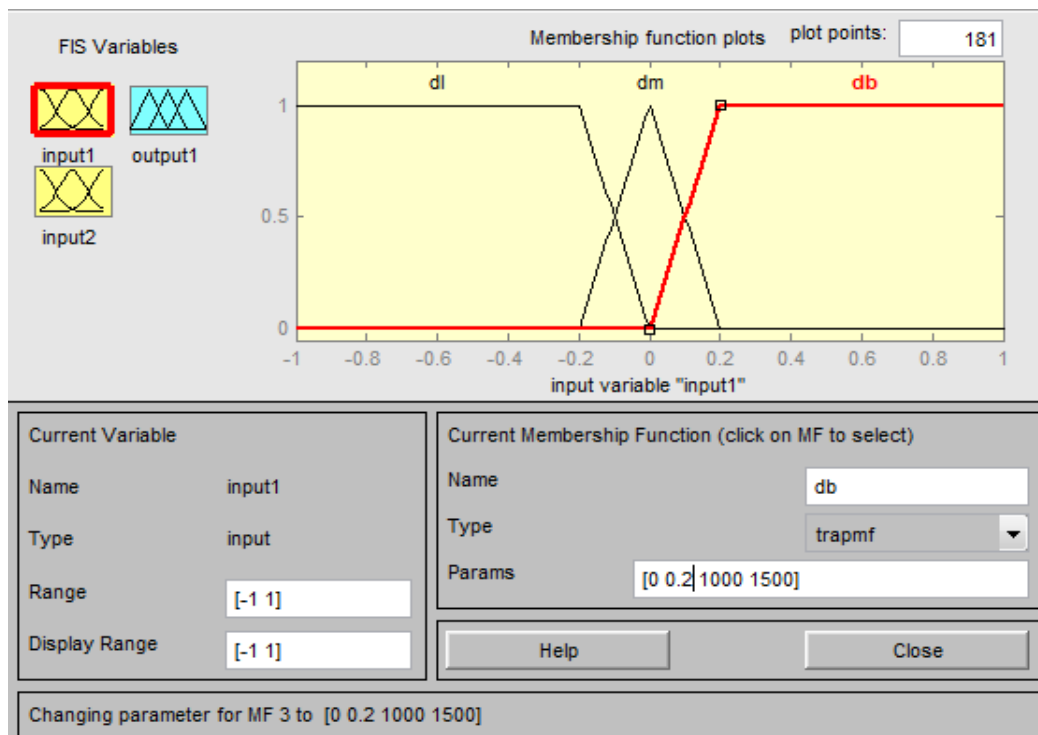
# CAPÍTULO 7: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

---

## CAPÍTULO 7: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En primer lugar hay que señalar que la obtención de los resultados óptimos se consigue mediante muchas pruebas y desarrollarlas todas es inviable. Por ello se han seleccionado las dos representativas. A continuación se desarrolla la propuesta 1.

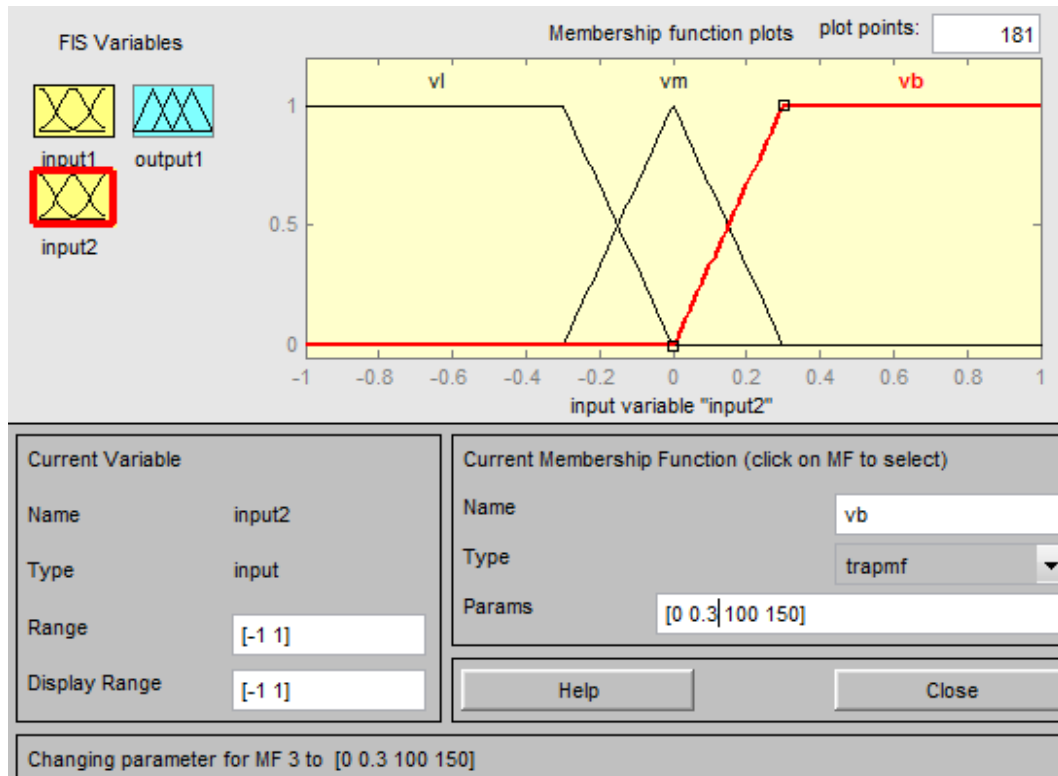
Los rangos utilizados en la propuesta 1 para cada variable se muestran seguidamente. En primer lugar se muestra la configuración “fuzzy” de la variable de entrada desplazamiento (véase Figura 7.1).



**Figura 7.1.** Variable de entrada desplazamiento

## CAPÍTULO 7: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

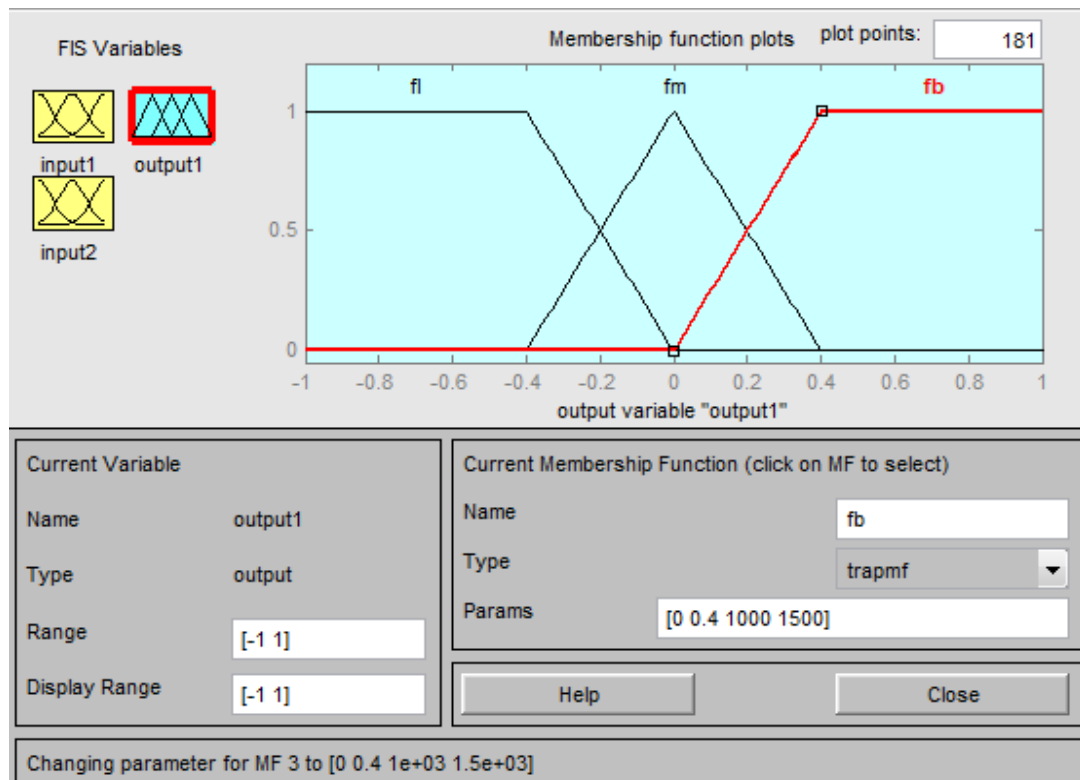
En segundo lugar, se muestra la lógica “fuzzy” de la segunda variable de entrada, la velocidad (véase Figura 7.2).



**Figura 7.2.** Variable de entrada velocidad

## CAPÍTULO 7: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

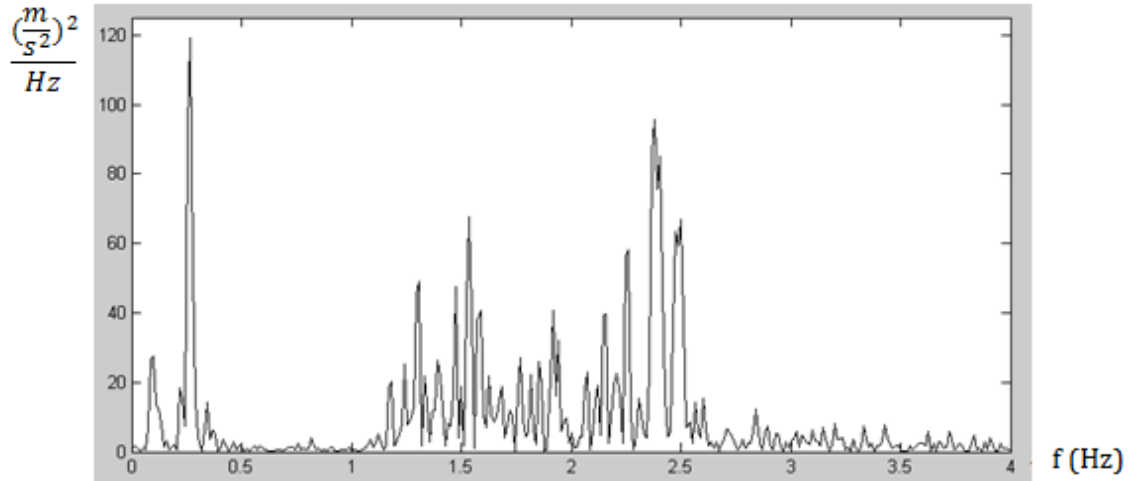
Por último se expone la lógica “fuzzy” de la variable de salida, la fuerza (véase Figura 7.3).



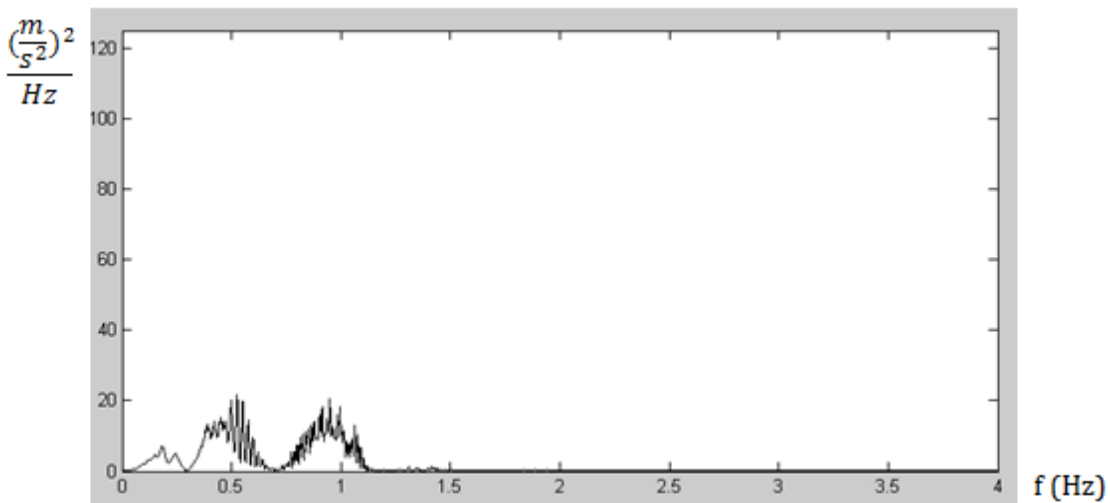
**Figura 7.3.** Variable de salida fuerza

## CAPÍTULO 7: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Una vez descritos los rangos de las variables, se puede obtener el valor RMS tanto para la suspensión activa como para la pasiva (véase Figura 7.11). Además, se calcula el valor PSD a través de las gráficas mostradas a continuación (véanse Figuras 7.4 y 7.5):



**Figura 7.4.** PSD para la suspensión activa



**Figura 7.5.** PSD suspensión pasiva

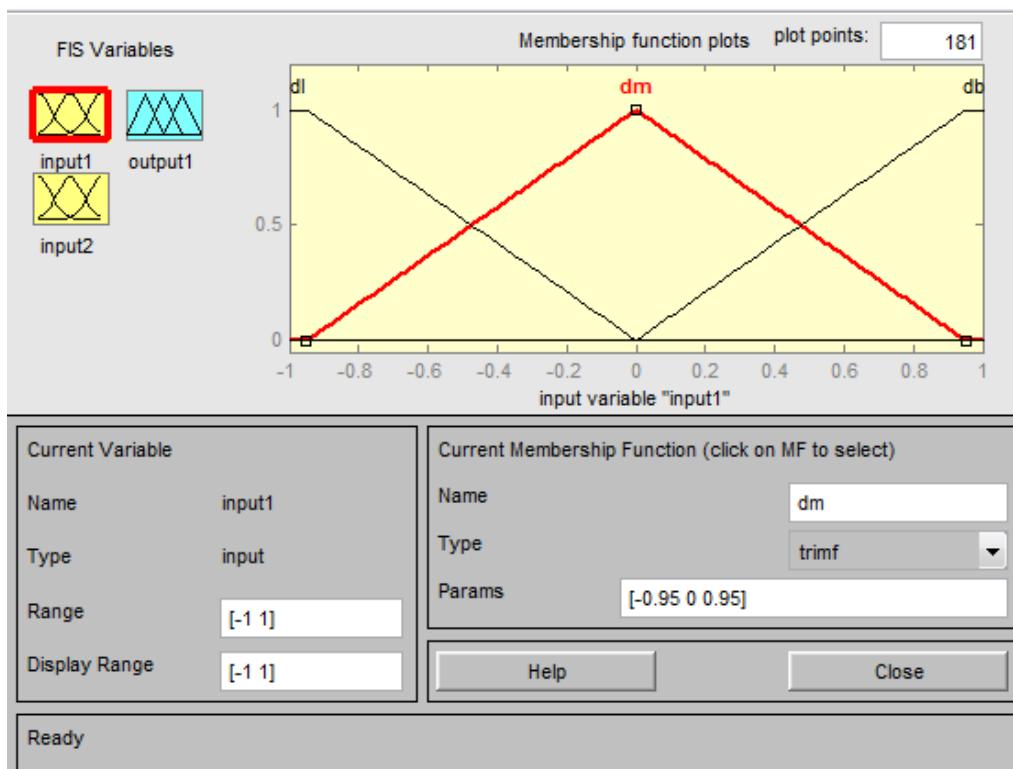
En la figura 7.11 se observa que el RMS de la suspensión activa es mucho mayor que la pasiva, y lo deseado es lo contrario. Además la amplitud de la gráfica PSD es mucho mayor en la suspensión activa que la pasiva. Luego este resultado es malo ya que debería cumplir los dos requisitos, luego hay que variar las gráficas de “fuzzy” hasta dar con la solución óptima que cumpla que el RMS en activa sea menor que en pasiva y que las amplitudes del PSD en la suspensión activa sean menores que en la pasiva.

## CAPÍTULO 7: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Destacar que el valor de RMS en la suspensión pasiva no debería variar ya que en este tipo no se influye en su comportamiento. Por la misma razón el valor PSD tampoco debe variar.

Se desarrolla ahora la propuesta 2.

A continuación se muestran los rangos de las variables tanto de entrada como de salida. En primer lugar se muestra la lógica “fuzzy” de la variable de entrada desplazamiento (véase Figura 7.6).

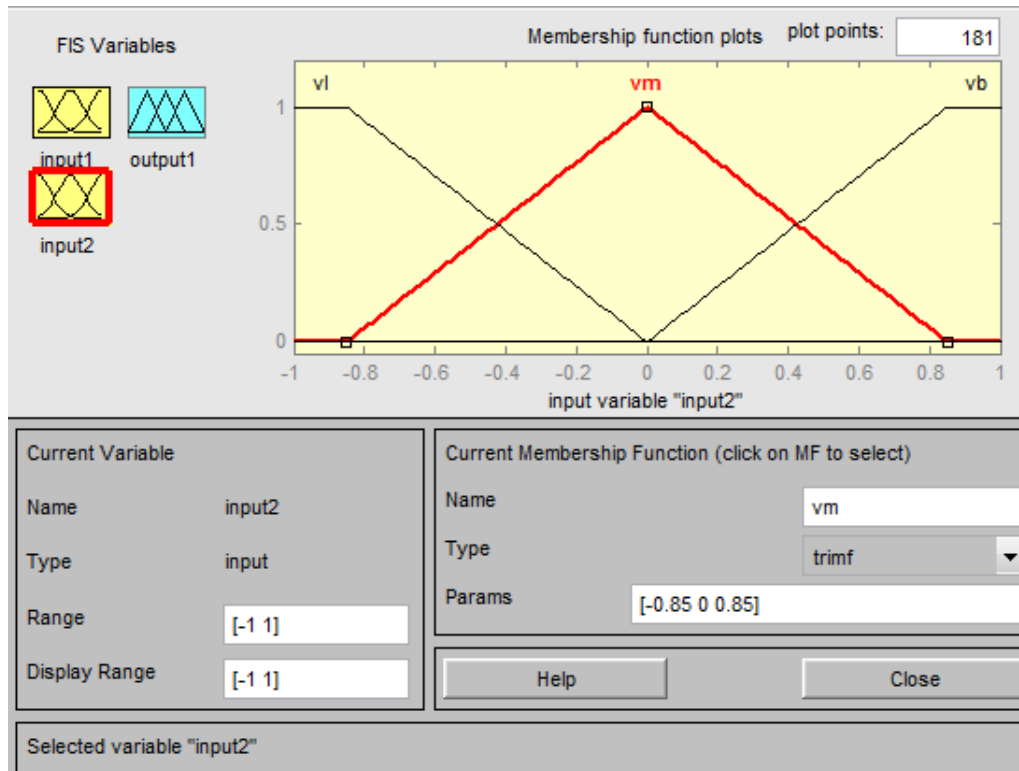


**Figura 7.6.** Resultados fuzzy para la variable de entrada desplazamiento



## CAPÍTULO 7: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

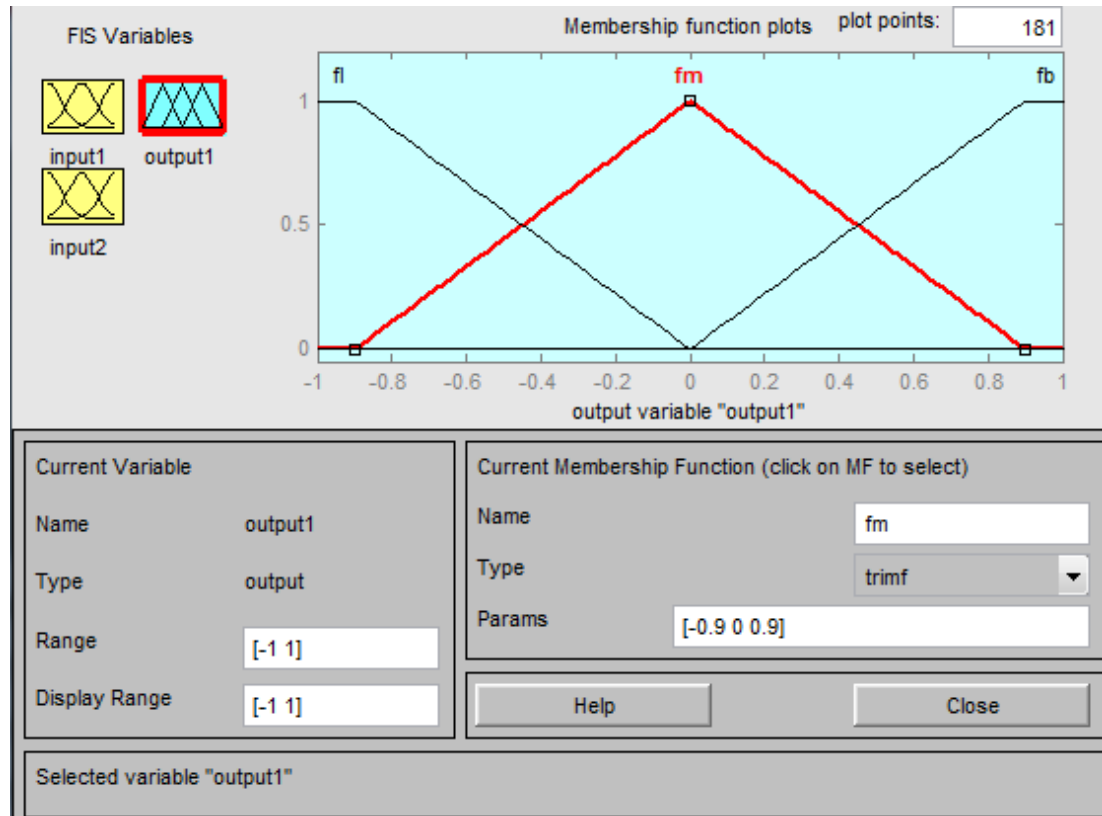
En segundo lugar se expone la lógica “fuzzy” de la segunda variable de entrada, la velocidad (véase Figura 7.7).



**Figura 7.7.** Resultados fuzzy para la variable de entrada velocidad

## CAPÍTULO 7: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

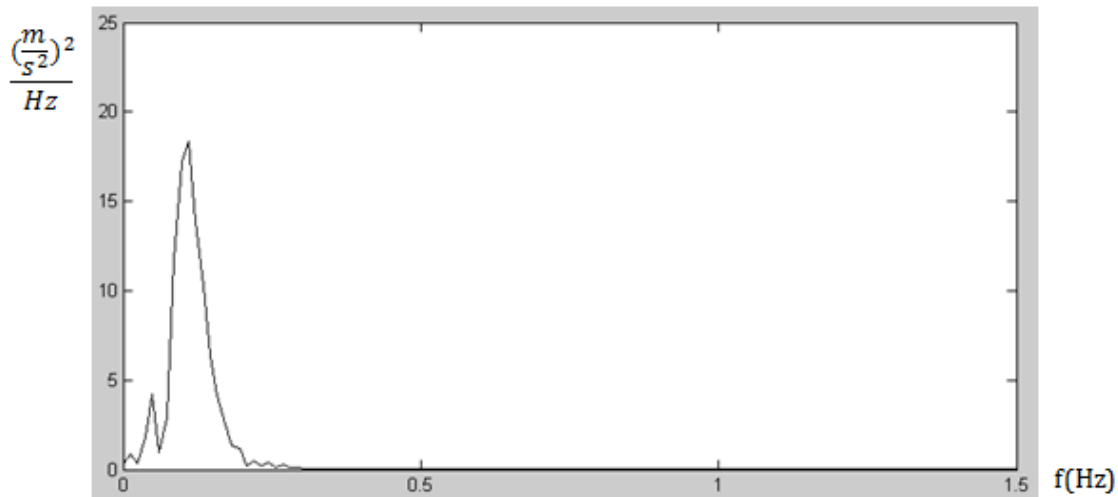
Por último se muestra la lógica “fuzzy” de la variable de salida, la fuerza (véase Figura 7.8)



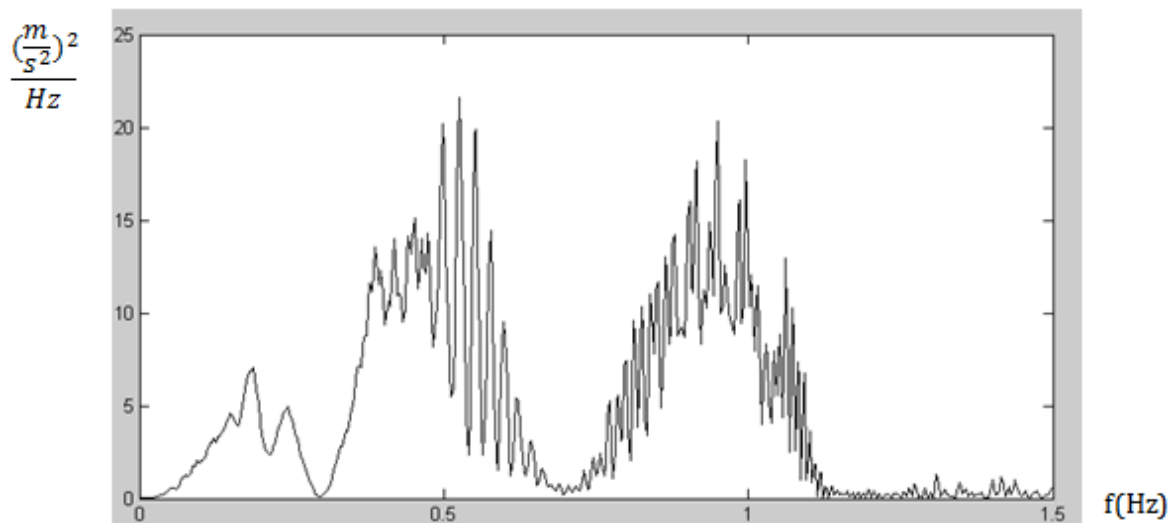
**Figura 7.8.** Resultados fuzzy para la variable de salida fuerza

## CAPÍTULO 7: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Una vez descritos los rangos, se procede a exponer la respuesta PSD en los siguientes gráficos (véanse Figuras 7.9 y 7.10):



**Figura 7.9.** Resultados psd con control



**Figura 7.10.** Resultados psd sin control

Como se puede ver en la Figura 7.11, se demuestra que la propuesta 2 es la solución correcta ya que tiene un valor de RMS menor en activa que en pasiva y, así mismo, unas oscilaciones a bajas frecuencias menores en la activa que en pasiva. Además se ha comprobado que la suspensión pasiva no varía al cambiar la lógica fuzzy lo que confirma que el procedimiento es correcto.

## CAPÍTULO 7: RESULTADOS DE SIMULACIÓN

---

	RMS (suspensión activa)	RMS (suspensión pasiva)
Propuesta 1	6.4313	2.6499
Propuesta 2	1.1131	2.6499

**Figura 7.11.** Resultados

# CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

---

## CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

---

De este estudio se demuestra que el comportamiento de la suspensión activa es mejor que en la pasiva casi en el doble de su valor en el caso del valor cuadrático medio de las oscilaciones de la suspensión (RMS) y en unos 5 puntos aproximadamente de variación en la amplitud de dichas oscilaciones (PSD). Por lo tanto el comportamiento del vehículo es bueno con la suspensión activa establecida.

Además se comprueba que las oscilaciones están por debajo de 3Hz en ambos casos (tanto para suspensión activa como pasiva) lo que asegura una buena confortabilidad para los pasajeros ya que a esas frecuencias no molestan las oscilaciones. Además, en el caso de la suspensión activa las oscilaciones ocurren a más bajas frecuencias aún (entre 0 y 0.5Hz) que en la suspensión pasiva (entre 0 y 2Hz), por lo que confirma que es una buena solución.

Para mejorar esta suspensión aún más se podría optar por el aumento de la constante de la fuerza o por la modificación de las reglas de la lógica fuzzy. Puesto que este sistema, ideado para controlar el comportamiento de la suspensión, se basa en “prueba y error” de números casi aleatorios puede existir una solución aún más óptima a la encontrada.

# CAPÍTULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

## CAPÍTULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [1] Pérez Vaca, José Eduardo. *Diseño y cálculo del bastidor de un vehículo cosechador de fresas*, Trabajos y proyectos fin de estudios de la E.T.S.I., 27-Julio-2011. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4983/fichero/1+Memoria%252FCapitulo+2+E+l+bastidor+de+un+vehiculo.pdf>
  
- [2] *Mantenimiento de vehículos*, Centro de documentación de estudios y oposiciones. Disponible en: [http://www.serina.es/empresas/cede\\_muestra/304/TEMA%20MUESTRA.pdf](http://www.serina.es/empresas/cede_muestra/304/TEMA%20MUESTRA.pdf)
  
- [3] Andrino Cebrián, Juan Antonio. *Mecánica y entretenimiento simple del automóvil*, DGT, 2011. Disponible en: [http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/formacion-vial/cursos-para-profesores-y-directores-de-autoescuelas/doc/XIV\\_Curso\\_30\\_MecanicayEntretenimiento.pdf](http://www.dgt.es/Galerias/seguridad-vial/formacion-vial/cursos-para-profesores-y-directores-de-autoescuelas/doc/XIV_Curso_30_MecanicayEntretenimiento.pdf)
  
- [4] *Motores de combustión interna*, G.U.N.T, Equipment for engineering education. Disponible en: [http://www.gunt.de/download/int\\_comb\\_engines\\_spanish.pdf](http://www.gunt.de/download/int_comb_engines_spanish.pdf)
  
- [5] *Motores térmicos*, Plataforma educativa aragonesa. Disponible en: [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4932/html/5\\_motor\\_de\\_dos\\_tiempos.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4932/html/5_motor_de_dos_tiempos.html)
  
- [6] Domínguez Soriano, Esteban José y Ferrer Ruíz, Julián. *La transmisión en los vehículos*, Libros de textos digitales y material didáctico, 2008, Editorial Editex. Disponible en: [http://www.editexebooks.es/AdjuntosLibros/Sist\\_Transm-Frenado\\_Ud01.pdf](http://www.editexebooks.es/AdjuntosLibros/Sist_Transm-Frenado_Ud01.pdf)
  
- [7] *El embrague*, IMAC (Ingeniería Mecánica Aplicada y computacional), Universidad de Navarra, Febrero 2008. Disponible en: [http://www.imac.unavarra.es/web\\_imac/pages/docencia/asignaturas/maquinas-iti/Trabajos/Embragues.pdf](http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/maquinas-iti/Trabajos/Embragues.pdf)
  
- [8] Molero, Luis. *Los frenos en el automóvil*, Centro de formación CDR. Disponible en: <http://cdr.es/uploads/MFG/Los%20Frenos.pdf>





## CAPÍTULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [9] Sagarra Pérez de Obanos y Martínez Landa Paulino. *Diseño de un sistema hidráulico de frenos*, Escuela técnica superior de ingenieros industriales y telecomunicación, Septiembre 2010. Disponible en:  
<http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/1936/577125.pdf?sequence=1>
  
- [10] López Manzanares, Cipriano, *Frenos*, Centro educativo EFA Moratalaz. Disponible en:  
<http://www.actiweb.es/servicionavarro/archivo1.pdf>
  
- [11] *Suspensión y dirección*, Centro educativo EFA Moratalaz. Disponible en:  
<http://efamoratalaz.com/recursos/1%C2%BAEl-Fluidos-T8.pdf>
  
- [12] Hernández Valencia, Jorge. *Sistemas de Suspensión, amortiguación y dirección*, Fundación Universidad de Atacama, Escuela Técnico Profesional. Disponible en:  
<http://www.etp.uda.cl/old/areas/electromecanica/MODULOS%20%20TERCERO/SISTEMAS%20DE%20DIRECCI%C3%93N%20Y%20SUSPENSI%C3%93N/Gu%C3%ADA%20N%C2%BA%20%20Direcci%C3%B3n.pdf>
  
- [13] López Barros, José Manuel. Estudio teórico de la alineación de un vehículo, Universidad Carlos III de Madrid, Agosto 2011. Disponible en:  
[http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/13328/PFC\\_JOSE-MANUEL\\_LOPEZ\\_BARROS.pdf?sequence=1](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/13328/PFC_JOSE-MANUEL_LOPEZ_BARROS.pdf?sequence=1)
  
- [14] Pérez Belló, Miguel Ángel. Libro: *“Circuitos de fluidos, suspensión y dirección”*, Abril 2011. Editorial: Paraninfo.
  
- [15] Ibáñez de Aldecoa García, Rafael. *Estudio y simulación con Simulink de vuelco de un vehículo pesado en adelantamiento*, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica, Febrero 2011. Disponible en:  
[http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/12864/PFC\\_Rafael\\_IbanezdeAldecoa\\_Garcia.pdf?sequence=1](http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/12864/PFC_Rafael_IbanezdeAldecoa_Garcia.pdf?sequence=1)
  
- [16] *Descripción del sistema de control hidráulico de la suspensión activa*, Universidad Politécnica Salesiana. Disponible en:  
<http://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1144/6/CAPITULO%20I.pdf>



## CAPÍTULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [17] *Modelado de sistemas dinámicos*, Facultad de ciencias exactas, ingeniería y agrimensura. Disponible en:  
<http://www.fceia.unr.edu.ar/fceia1/mecanica/Automotores/MODELADO%20DE%20SIEMAS%20DINAMICOS.pdf>
  
- [18] Rodríguez Ramírez, Daniel y Bordóns Alba, Carlos. *Análisis y control de sistemas en espacio de estado, identificación de sistemas control adaptativo control predictivo*, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 2005. Disponible en:  
<http://www.esi2.us.es/~danirr/apuntesIC4.pdf>
  
- [19] Rodríguez Ramírez, Daniel y Alamo Cantarero, Teodoro. *Identificación mediante el método de los mínimos cuadrados*. Disponible en: [http://www.control-class.com/Tema\\_2/Slides/Tema\\_2\\_IdentificacionMinimosCuadrados.pdf](http://www.control-class.com/Tema_2/Slides/Tema_2_IdentificacionMinimosCuadrados.pdf)
  
- [20] *Cálculo y análisis dinámica del automóvil*, Universidad Politécnica Salesiana. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1132/4/CAPITULO%20III.pdf>
  
- [21] Universidad Politécnica Salesiana. Disponible en:  
<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1141/5/CAPITULO%20I.pdf>
  
- [22] Fondevila Martínez, Carlos. *Diseño de los elementos de suspensión de un vehículo de competición*, Universidad Politécnica de Cataluña, junio 2011. Disponible en:  
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/12852/2/Mem%C3%B2ria.pdf>
  
- [23] Águila Soto, Antonio. *Procedimiento de evaluación de riesgos ergonómicos y psicosociales*. Universidad de Almería. Disponible en:  
<http://www.ual.es/GruposInv/Prevencion/evaluacion/procedimiento/B-%20Condiciones%20f%EDsico-ambientales/6-Vibraciones.pdf>
  
- [24] Badilla Vargas, Gustavo. *Determinación de la regularidad superficial del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Regularidad Internacional*, Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica. Disponible en:  
[http://www.lanamme.ucr.ac.cr/riv/index.php?option=com\\_content&view=article&id=267&Itemid=269](http://www.lanamme.ucr.ac.cr/riv/index.php?option=com_content&view=article&id=267&Itemid=269)



## CAPÍTULO 9: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- [25] Morata Palacios, Francisco. *Controlador Fuzzy de un Quadrotor*, Universidad complutense de Madrid, 2008-2009. Disponible en:  
[http://eprints.ucm.es/9915/1/Controlador\\_Fuzzy\\_de\\_un\\_Cuadrotror.pdf](http://eprints.ucm.es/9915/1/Controlador_Fuzzy_de_un_Cuadrotror.pdf)
  
- [26] Pérez Pueyo, Rosanna. *Procesado y optimización de Espectros Raman mediante Técnicas de Lógica Difusa: Aplicación a la identificación de Materiales de Pictóricos*, 2005, Tesis doctorales en red. Disponible en:  
<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6887/04Rpp04de11.pdf?sequence=4>
  
- [27] Hernández Bello, Irmig Isaac. *Control difuso y construcción de un mecanismo capaz de golpear con distintos efectos una bola de billar*, Colección de tesis digitales Universidad de las Américas Puebla, 2004. Disponible en:  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/hernandez\\_b\\_ii/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_b_ii/capitulo4.pdf)
  
- [28] Cignus Research International, Professional Computational Services for Professionals and for Ordinary People. Disponible en:  
<http://www.cygres.com/OcnPageE/Glosry/SpecE.html>

